



Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Grado en Ingeniería Electromecánica

Trabajo Fin de Grado

*Estudio del estado del arte de la tecnología de
recarga autónoma en vehículos eléctricos
mediante micro-turbinas de gas*

Martín Ortiz Mora

Tutor: Carlos Ortiz Domínguez

Sevilla, junio de 2020

Agradecimientos

*La realización de este Trabajo Fin de Grado no hubiese
sido posible sin las personas que me han
acompañado en mi trayectoria académica a lo
largo de estos años.*

*Quiero agradecer a mi tutor Carlos Ortiz Domínguez
su gran ayuda y dedicación en este trabajo, por
haberme guiado y dedicado parte de su tiempo.*

*A mis profesores, compañeros de clase y mi familia que
han estado presentes con su apoyo durante mi
Grado en Ingeniería Electromecánica.*

Resumen

La principal idea que a todos se nos viene a la cabeza cuando hablamos del coche eléctrico es que no contamina, es decir, no produce gases de efecto invernadero ya que en principio un coche eléctrico no realiza una combustión. Esto se debe a que los vehículos eléctricos funcionan mediante la electricidad que almacena en su batería, convirtiéndola en energía para alimentar los motores que propulsan el coche. Un punto muy favorable teniendo en cuenta los grandes problemas de contaminación que tenemos hoy en día, sobre todo en las ciudades. Pero la contaminación no es sólo atmosférica. Un vehículo de combustión interna alternativa también produce contaminación acústica, sin embargo, un vehículo eléctrico, produce muy poco ruido, llegando a estar obligados a producir un sonido virtual para ser escuchados hasta que alcancen los 20 km/h. Otra particularidad de este tipo de vehículos es que el coste de mantenimiento del motor que nos produce un vehículo diésel o gasolina es bastante alto, sin embargo, con un coche eléctrico este gasto es muy bajo. Esto se debe al propulsor del coche eléctrico, ya que contiene muy pocas piezas, siendo mucho más fiable que los motores de combustión interna alternativa. Por lo tanto, un motor eléctrico es muy improbable que falle, ya que su arquitectura es muy simple, sin embargo, los motores tradicionales están expuestos a numerosos fallos (en el sistema de refrigeración, del aceite...) e incluso dejar el motor inutilizado por no estar bien lubricado o funcionar a una elevada temperatura, algo que nos dejaría sin coche, ya que cambiar un motor de combustión interna alternativo es muy caro, y en la mayoría de los casos no merece la pena, sin contar el tiempo que tardaría la reparación. En cuanto a la eficiencia, un vehículo eléctrico es mucho más eficiente que uno tradicional, obteniendo un rendimiento de aproximadamente un 90%, mientras que un motor de combustión interna alternativo se queda en el 30% aproximadamente, es decir, un vehículo eléctrico necesita menos energía para realizar un trayecto similar, por lo que consume menos. Además, de lo anteriormente mencionado podemos añadir a estas ventajas las posibles bonificaciones en los aparcamientos públicos.

Al igual que encontramos muchas ventajas en un vehículo eléctrico, también tenemos algunos inconvenientes. Antes de adquirir un vehículo eléctrico, es recomendable disponer de un garaje propio, además de la instalación necesaria para poder cargar la batería del coche mientras está aparcado, ya que cargarlo en un cargador público es bastante más caro. Pero, para la carga del vehículo fuera de nuestro garaje la situación se complica, aunque cada día aumentan en número los puntos de carga para coches eléctricos en nuestro país, aunque por el momento siguen siendo insuficientes. Otro aspecto a considerar es el precio inicial de compra de un coche

eléctrico, ya que es superior a la de uno tradicional. La razón del alto coste son las baterías. Aunque no es frecuente que los vehículos eléctricos se averíen, existe la posibilidad y es difícil encontrar un taller capacitado, que no sea el oficial, para arreglarnos nuestro coche eléctrico. Es cierto que los vehículos eléctricos no contaminan ya que no producen emisiones, pero, al comienzo de los puestos de cargas públicos, la electricidad que se producía para cargarlos sí contaminaba. Hoy en día, la mayoría de empresas de cargadores públicos adquieren la electricidad de fuentes renovables, como la solar, la eólica o hidráulica, apostándose cada vez más por ellas.

Sin duda alguna y el mayor inconveniente de los vehículos eléctricos es la autonomía, siendo la principal razón por la que las personas no terminan de hacer la transición hacia lo eléctrico. Esto se debe a que si, por ejemplo, quisiéramos realizar un viaje, lo vamos a tener complicado, ya que la autonomía media de un coche eléctrico es de unos 300 km. Este es el principal motivo para presentar una posible solución a este problema, mediante la incorporación de un extensor de rango a un vehículo eléctrico, que proporcione un incremento de autonomía que permita realizar grandes desplazamientos sin el inconveniente de quedarse sin carga durante el viaje. Para ello se presenta una solución novedosa e innovadora que posibilitará la recarga del vehículo mediante la utilización de una micro-turbina de gas, de diseño compacto, bajo peso, bajo consumo y que, aunque en principio pudiera admitir cualquier tipo de combustible (incluso hidrógeno), se estimará la utilización de gas natural como combustible disponible y con gran aceptación por su bajo impacto ambiental, cada vez mayor red de distribución y su bajo precio.

Palabras clave: electricidad, contaminación, coste, rendimiento, autonomía, extensor de rango, micro-turbina

Abstract

The main idea that comes to mind when we all talk about the electric car is that it does not pollute, that is, it does not produce greenhouse gases since, in principle, an electric car does not combustion. This is because electric vehicles run on the electricity it stores in its battery, converting it into energy to power the engines that power the car. A very favorable point considering the major pollution problems that we have today, especially in cities. Nevertheless, pollution is not just atmospheric. An alternative internal combustion vehicle also produces noise pollution; however, an electric vehicle produces very little noise, being forced to produce virtual sound to be heard until they reach 20 km/h. Another peculiarity of this type of vehicle is that the maintenance cost of the engine produced by a diesel or gasoline vehicle is quite high; however, with an electric car this expense is very low. This is due to the electric car's engine, as it contains very few parts, being much more reliable than alternative internal combustion engines. Therefore, an electric motor is very unlikely to fail, as its architecture is very simple, however, traditional motors are exposed to numerous failures (in the cooling system, oil ...) and even leave the motor unused by not being well lubricated or operating at a high temperature, something that would leave us without a car, since changing an alternative internal combustion engine is very expensive, and in most cases it is not worth it, not counting the time it would take repair. As for efficiency, an electric vehicle is much more efficient than a traditional one, obtaining an efficiency of approximately 90%, while an alternative internal combustion engine remains at approximately 30%, meaning that an electric vehicle needs less energy to make a similar journey, so it consumes less. In addition, from the aforementioned we can add to these advantages the possible discounts in public parking.

Just as we find many advantages in an electric vehicle, we also have some disadvantages. Before acquiring an electric vehicle, it is advisable to have your own garage, in addition to the necessary installation to be able to charge the car battery while it is parked, since charging it in a public charger is much more expensive. But, charging the vehicle outside our garage, the situation is complicated, although the number of charging points for electric cars in our country increases in number every day, although at the moment they are still insufficient. Another aspect to consider is the initial purchase price of an electric car, since it is higher than that of a traditional one. The reason for the high cost is the batteries. Although it is not often that electric vehicles break down, there is a possibility and it is difficult to find a trained workshop, other than the official one, to fix our electric car. It is true that electric vehicles do not pollute since they do not produce

emissions, but, at the beginning of public charger, the electricity produced to charge them did pollute. Today, most public charger companies purchase electricity from renewable sources, such as solar, wind or hydro, increasingly betting on them.

Without any doubt and the biggest drawback of electric vehicles is autonomy, being the main reason why people do not finish making the transition to electric. This is because if, for example, we wanted to make a trip, we are going to have it complicated, since the average autonomy of an electric car is about 300 km. This is the main reason to present a possible solution to this problem, by incorporating a range extender into an electric vehicle, which provides an increase in autonomy that allows for long journeys without the inconvenience of running out of load during the trip. For this, a novel and innovative solution is presented, that will make it possible to recharge the vehicle by using a micro-gas turbine, compact in design, low weight, low consumption and that, although in principle it could accept any type of fuel (including hydrogen), the use of natural gas as an available fuel will be estimated and widely accepted due to its low environmental impact, its increasing distribution network and its low price.

Keywords: electricity, pollution, cost, efficiency, autonomy, range extender, micro-turbine

Índice

1.	Introducción a las turbinas de gas	3
1.1.	Turbinas de gas.....	3
1.2.	Ciclo Brayton	6
1.3.	Micro-turbinas	10
1.3.1.	Descripción.....	10
1.3.2.	Ventajas energéticas y ambientales.....	11
1.3.3.	Aplicaciones	12
2.	Historia de la tecnología en automoción	14
2.1.	El comienzo del automóvil.....	14
2.2.	El intento de coche eléctrico en 1800	15
2.3.	Progreso y evolución de la gasolina	15
2.4.	Un transporte para todos los públicos	16
2.5.	Tipos de motores	18
2.5.1.	Motores de gasolina	18
2.5.2.	Combustibles alternativos: el gas.....	20
2.5.3.	Motores diésel.....	20
2.5.4.	Motores alternativos.....	21
2.6.	Implantación de la micro-turbina de gas en automóviles.....	22
3.	Estado del arte de micro-turbinas.....	25
3.1.	Micro-turbinas en la actualidad	25
3.2.	Principales fabricantes de micro-turbinas	35
3.2.1.	Capstone	35
3.2.2.	Bladon Jets	36
3.2.3.	Wrightspeed Powertrains	38
3.2.4.	Ecojet Engineering.....	42

4.	Micro-turbina para extensión de rango en vehículos eléctricos	44
4.1.	Comparación de diferentes combustibles.....	44
4.1.1.	Evolución de los motores y tendencias.	44
4.1.2.	Carburantes convencionales (gasóleo y gasolina)	45
4.1.3.	Usos de biocombustibles en altos porcentajes	45
4.1.4.	Gas natural.....	46
4.1.5.	GLP.....	48
4.1.6.	Vehículos eléctricos	48
4.1.7.	Hidrógeno.....	49
4.1.8.	Emisión de gases regulados	51
4.1.9.	Costes de la energía por tipo de tecnología	52
4.2.	Integración con el vehículo	54
4.2.1.	Descripción del sistema.....	55
4.2.2.	Características de baterías para vehículos eléctricos.....	59
4.2.3.	Tipos de baterías	60
5.	Modelado de una micro-turbina de gas	66
5.1.	Modelo termodinámico.....	66
5.2.	Simulación	70
5.3.	Análisis de sensibilidad del modelo	73
6.	Análisis económico preliminar	79
6.1.	Análisis económico.....	79
7.	Conclusiones	86

1. Introducción a las turbinas de gas

1.1. Turbinas de gas

Las turbinas de gas generan la energía mecánica a partir de un estado térmico procedente de una reacción de combustión. Generalmente se trata de un motor térmico de combustión interna, que es de lo que trataremos principalmente en este trabajo. En las turbinas de gas el fluido motor es el que sufre la transformación térmica originada por la reacción química de combustión en ciclo abierto. La *Figura 1* muestra el esquema conceptual de una turbina de gas de combustión interna.

Los elementos principales que conforman una turbina de gas son tres: un compresor que puede ser centrífugo o axial, una cámara de combustión con varias configuraciones posibles y por último una turbina (*Figura 2*). Parte de la potencia generada en la turbina se utiliza en la compresión mientras la restante se destina principalmente a la producción de energía eléctrica o para mover un vehículo.

El compresor, que supondremos adiabático, alimentado por aire a la temperatura y presión atmosféricas, en el mismo se reproduce un proceso de compresión.

El siguiente elemento que nos encontramos es la cámara de combustión, donde tiene lugar la reacción química de combustión una vez mezclados el aire comprimido y el combustible, alcanzando el fluido un nivel energético elevado, capaz de mover la turbina en el proceso de expansión a través de la misma. Este tipo de máquina térmica permite utilizar una gran variedad de combustibles, tanto líquidos como gaseosos.

Al final, el elemento que produce el trabajo necesario para mover el conjunto del motor térmico y disponer de trabajo mecánico extra que puede ser utilizado en distintas aplicaciones es la turbina. Con el avance de los materiales cerámicos utilizados en los recubrimientos de las primeras etapas junto con un sistema de extracción de aire del compresor que permite refrigerarlos, se pueden alcanzar temperaturas elevadas de los gases a la entrada, realizándose la expansión de los mismos hasta alcanzar la presión atmosférica.

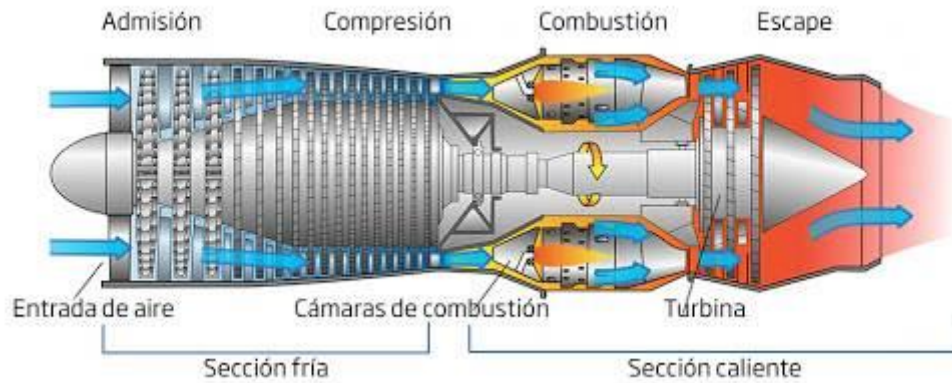


Figura 1: Esquema conceptual de una turbina de gas de combustión interna

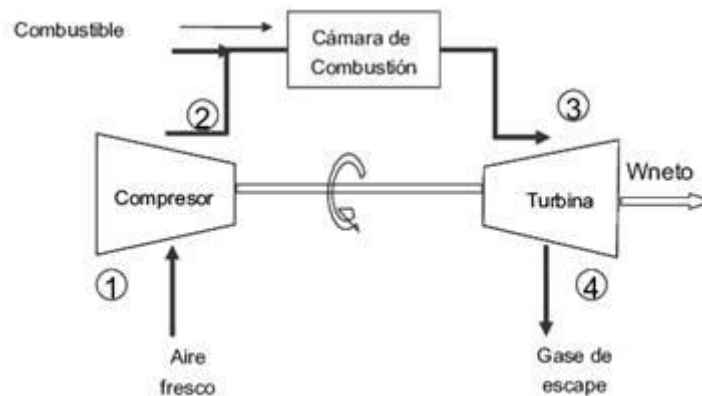


Figura 2: Esquema de los componentes de una turbina de gas

Como se verá más adelante la eficiencia de la turbina de gas es muy dependiente de la temperatura de gases de entrada a la turbina, sin olvidarnos de un diseño óptimo del resto de elementos y por supuesto de las condiciones ambientales de entrada al compresor.

Actualmente se pueden obtener rendimientos en las turbinas de gas de ciclo simple que oscila entre el 30 y 40% [1], siendo capaz de funcionar en unos amplios márgenes de potencia desde menos de 1 MW a superar los 500 MW [2].

Las turbinas pueden clasificarse, por su configuración, en:

Eje simple o eje doble

Representa el modo en que los componentes del motor se conectan entre sí (Figura 3).

- Montaje en un eje: compresor, turbina y alternador están conectados por un único eje.

- Montaje en dos ejes: el eje de alta presión conecta el compresor con la turbina de alta presión mientras el eje de baja presión conecta la turbina de potencia con el alternador.

Ventajas del montaje en un eje:

- Tiene más inercia, por lo que se reduce el riesgo de embalamiento.
- Se puede emplear el alternador para arrancar el motor.

Ventajas del montaje en doble eje:

- La velocidad de giro del eje de alta presión no está condicionada por la frecuencia de la carga.
- Es más flexible

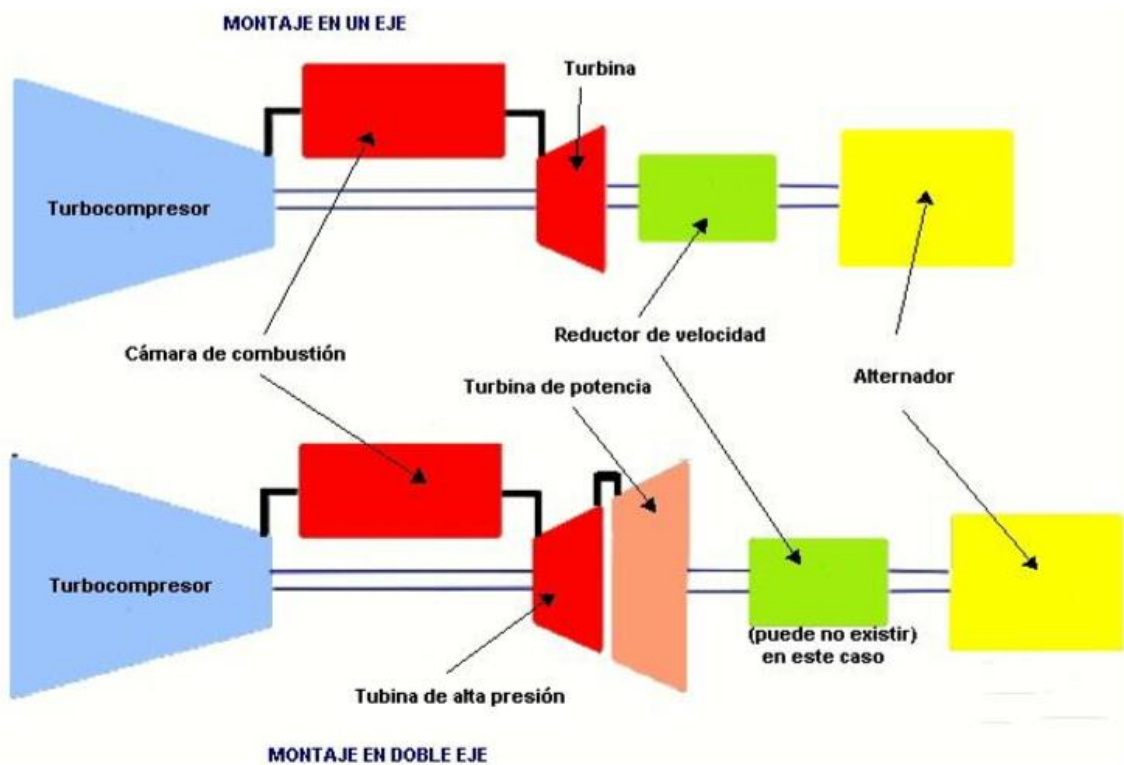


Figura 3: Montajes turbina de gas

Ciclo simple o con regeneración

En las de ciclo simple, se mezcla el aire comprimido con el combustible y se hace la combustión bajo condiciones de presión constante. Las unidades de ciclo regenerativo (*Figura 4*) usan un intercambiador de calor, con la finalidad de recuperar calor de la corriente de salida de la turbina y transferirla a la corriente de entrada del aire. El hecho de combinar las micro-turbinas con equipos de recuperación de energía para transferir el calor al aire de combustión provoca que con estos sistemas pueda llegar a doblarse la eficiencia eléctrica de la micro-turbina.

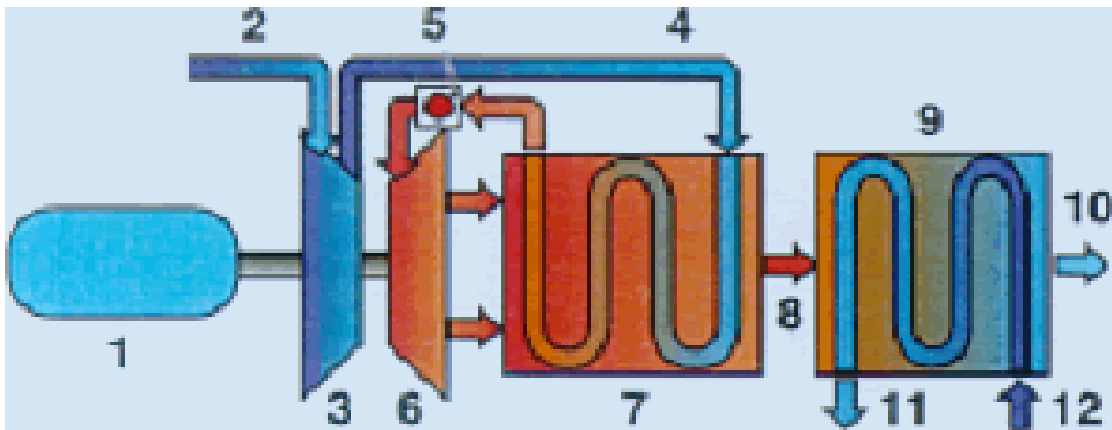


Figura 4: Esquema ciclo con regenerador en turbina

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Generador. | 7 Regenerador. |
| 2. Entrada de aire. | 8 Gas de caldera. |
| 3. Compresor. | 9 Caldera de recuperación. |
| 4. Aire en el regenerador. | 10 Gases de escape. |
| 5. Cámara de combustión. | 11 Salida de agua caliente. |
| 6. Turbina. | 12 Entrada de agua. |

1.2. Ciclo Brayton

El ciclo Brayton es un ciclo termodinámico de potencia utilizado por las turbinas de gas, en el cual el aire fresco se introduce en condiciones de ambiente en el compresor, donde se temperatura y presión se eleva, alcanzada estas condiciones el aire continúa hasta la cámara de combustión, en la misma el combustible reacciona a presión constante y posteriormente se expande en la turbina hasta alcanzar la presión atmosférica produciendo potencia.

El ciclo Brayton básico es en realidad un ciclo abierto, en el que la admisión del aire del aire y el escape de los gases se realizan de y a la atmósfera.

Se supondrán las siguientes condiciones ideales:

- Los procesos de compresión y expansión son reversibles y adiabáticos, es decir isentrópico.

- La variación de la energía cinética del fluido motor entre la entrada y la salida de cada elemento es despreciable.
- No existen pérdidas de carga en los conductos de admisión, cámara de combustión, intercambiadores de calor, gases de escape y uniones entre los elementos.
- El fluido motor es un gas ideal con calores específicos constantes y su composición no varía a lo largo de todo el ciclo.
- El caudal másico de gas se mantiene constante a lo largo de todo el ciclo.
- La transmisión de calor en los intercambiadores es completa, la temperatura del fluido frío aumenta lo máximo posible y a la vez exactamente igual al descenso de temperatura del fluido caliente.

De acuerdo con las condiciones descritas, la cámara de combustión en la que se introduce y quema el combustible, equivale a un calentador de fuente de calor externa.

Los procesos del ciclo de Brayton, (*Figura 5*), son los siguientes:

1-2 Compresión adiabática: el aire es aspirado por el compresor, incrementándose la presión y temperatura

2-3 Combustión a presión constante, adsorción de calor a presión constante. El aire entra en la cámara de combustión a elevada presión y se mezcla con el combustible, produciéndose la combustión a presión constante, elevándose considerablemente la temperatura del gas.

3-4 Expansión adiabática y reversible. El gas pasa por la turbina, produciéndose el intercambio energético, produciendo el movimiento. El gas a su paso por la turbina se expande, aumentando su volumen y descendiendo la presión del mismo.

4-1 El aire se enfría a la presión constante de la atmósfera, hasta la temperatura ambiente. Se produce una transferencia de calor al medio, cediendo calor al medio, alcanzando de nuevo la temperatura de entrada al compresor.

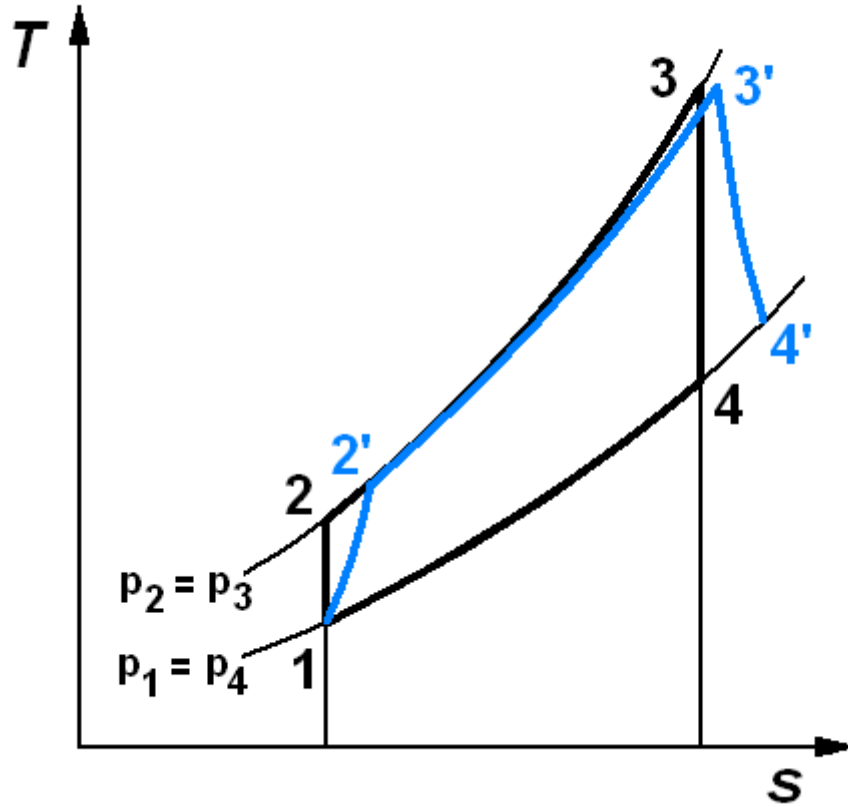


Figura 5: Diagrama T-s ciclo Brayton

La ecuación de la energía para flujo estacionario correspondiente al caso de estudio será:

$$Q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} (C_2^2 - C_1^2) + W \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo Q y W el calor y el trabajo específico. Aplicando esta ecuación a cada uno de los elementos y recordando que la variación de energía cinética del fluido motor entre la entrada y la salida de cada elemento es despreciable, tenemos:

$$W_{12} = -(h_2 - h_1) = -C_p(T_2 - T_1) \quad \text{Ec. 2}$$

$$Q_{23} = (h_3 - h_2) = C_p(T_3 - T_2) \quad \text{Ec. 3}$$

$$W = (h_3 - h_4) = C_p(T_3 - T_4) \quad \text{Ec. 4}$$

El rendimiento del ciclo será:

$$\eta = \frac{\text{Trabajo neto obtenido}}{\text{Calor aportado}} = \frac{C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} \quad \text{Ec. 5}$$

Utilizando la relación isoentrópica entre presiones y temperaturas, y teniendo en cuenta que $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ siendo C_p y C_v la capacidad calorífica del aire a presión y volumen constante respectivamente.

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_3}{T_4} \quad \text{Ec. 6}$$

Siendo r la relación de compresión $\frac{P_2}{P_1} = r = \frac{P_3}{P_4}$, por lo que el rendimiento del ciclo valdrá:

$$\eta = \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{Ec. 7}$$

El rendimiento depende pues únicamente de la relación de compresión y de la naturaleza del gas.

Puede demostrarse que el trabajo específico, W , del cual dependerá el tamaño de la planta para una potencia dada, es función no sólo de la relación de compresión sino también de la temperatura máxima del ciclo T_3 , de esta forma,

$$W = C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_2 - T_1) \quad \text{Ec. 8}$$

Que podemos poner de la forma:

$$\frac{W}{C_p * T_1} = t \left(1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) - \left(r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde $\frac{W}{C_p * T_1}$ es el trabajo específico adimensional, siendo $t = \frac{T_3}{T_1}$, T_1 es la temperatura ambiente.

Resulta conveniente representar el trabajo específico adimensional $\frac{W}{C_p * T_1}$ en función de t y r como puede verse en la figura. El valor de T_3 y por tanto el de t que puede utilizarse en la práctica depende de la temperatura máxima que puedan soportar las partes las primeras etapas de turbina de acuerdo con la vida que se requiera de las mismas, a t se le denomina con frecuencia “límite metalúrgico”.

Para cualquier valor dado de t , la relación de compresión de máximo trabajo específico se obtiene diferenciando la ecuación anterior con respecto a $r^{(y-1)/y}$ e igualando a cero, con lo que tendremos:

$$\frac{\gamma - 1}{\gamma} = t^{1/2} \quad \text{Ec. 10}$$

Y como $r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$ podemos poner $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = t$

Pero sabemos que $\frac{T_3}{T_1} = t$, de donde resulta que $T_2 = T_4$, por lo tanto, el trabajo específico será máximo cuando la relación de compresión sea tal que las temperaturas a la salida del compresor y de la turbina sean iguales. Para todos los valores de r comprendidos entre 1 y $t^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$, T_4 será mayor que T_2 , pudiendo entonces adoptarse un intercambiador de calor que disminuya el calor cedido por la fuente externa y aumentar el rendimiento.

1.3. Micro-turbinas

1.3.1. Descripción

Las micro-turbinas de gas son turbinas de combustión de tamaño pequeño, (*Figura 6*), con potencias que actualmente se sitúan entre 28 y 200 kW [3]. Están dotadas de generadores de alta velocidad de imán permanente que pueden girar a la misma velocidad que la turbina de gas, con lo que pueden acoplarse directamente sin necesidad de disponer de un sistema de caja de cambios [4].

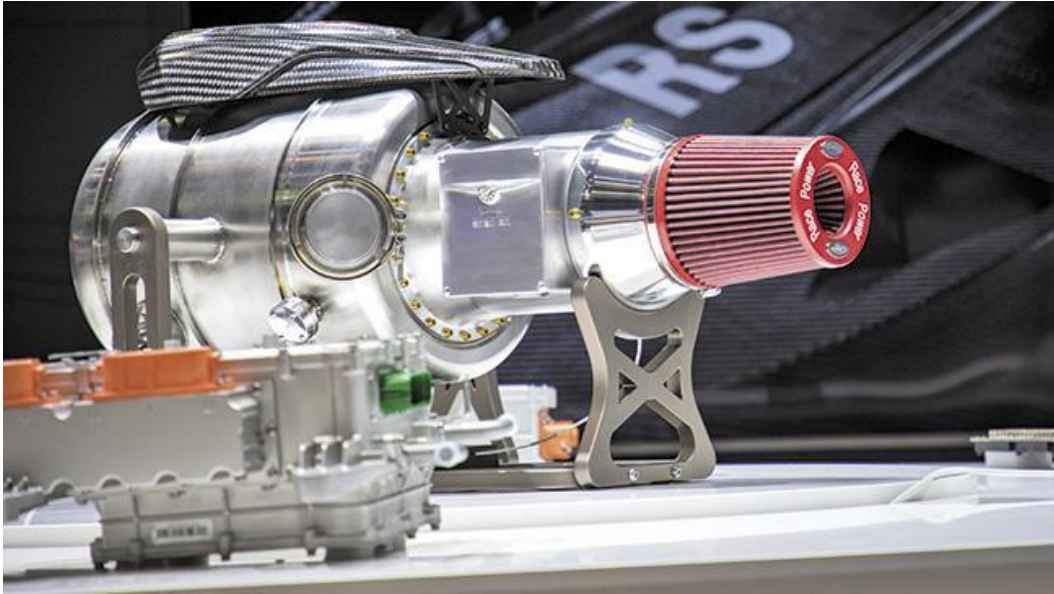


Figura 6: Micro-turbina para automóvil Tech-Rules

1.3.2. Ventajas energéticas y ambientales

El uso de las micro-turbinas ofrece un gran número de ventajas, en comparación con otras tecnologías de producción de energía a pequeña escala, como pueden ser los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA), principalmente [5]:

- Menor número de partes móviles, únicamente el eje de la micro-turbina. Ello implica un bajo mantenimiento y, además, en algunos equipos no hay consumo de aceite lubricante.
- Reducido peso y dimensiones. Un sistema similar de producción de energía eléctrica y agua caliente con un motor de gas de pistones de unos 40 kW de potencia eléctrica pesa más de 2.000 kg ante los 700 kg del sistema de micro-turbina de gas. Las dimensiones externas son similares en ambos casos.
- Energía térmica recuperable en una sola corriente. A diferencia de los motores de pistón, las turbinas de gas concentran el calor excedente en una sola corriente a alta temperatura, con lo que se simplifica la instalación. Los gases de escape de las micro-turbinas de gas son generalmente de alta calidad, dado que se encuentran a alta temperatura y libres de aceites. Ello los convierte en un sistema ideal para combinar con equipos de refrigeración para absorción de alta eficiencia (doble efecto, ciclos GAX, etc.) para la producción de frío y, también, para aplicaciones en los invernaderos de horticultura donde es necesario un suministro de calor y CO₂ con un bajo nivel de hidrocarburos. La eficiencia de estos sistemas puede ser muy elevada y, por lo tanto, muy atractiva para los casos en que, además de la demanda eléctrica, hay una demanda en climatización muy importante.

1.3.3. Aplicaciones

Las micro-turbinas de gas pueden aplicarse a diferentes sectores. A continuación, se enumeran algunas de estas aplicaciones [3]:

Microcogeneración

Los sistemas de microcogeneración son sistemas de cogeneración de baja potencia con los que puede generarse energía eléctrica, producir agua caliente, vapor o refrigeración activada térmicamente.

Aplicación directa del calor

Esta aplicación consiste en la utilización directa del calor contenido en los gases de escape para diversas aplicaciones, entre las que constan como más destacadas las siguientes:

- Accionamiento de equipos de refrigeración por absorción de llama directa con o sin poscombustión.
- Calefacción en invernaderos.
- Regeneración de desecantes en equipos de deshumidificación.
- Procesos de secado, favorecidos por la alta temperatura de los gases de escape.

Valorización energética.

Las micro-turbinas también se aplican para la valorización energética de productos susceptibles de ser utilizados como combustible, como, por ejemplo, en la combustión de gas de bajo poder calorífico como el biogás que se genera en vertederos, depuradoras de aguas residuales, etc.

Extensor de autonomía en vehículos eléctricos

Las micro-turbinas en vehículos híbridos, tiene como principal ventaja, poder recargar las baterías de los vehículos eléctricos, incrementando así su autonomía y capacidad de carga. Por eso se utiliza una versión de micro-turbina con generador de imanes permanentes.

Como extensor de autonomía, para su aplicación en un vehículo o como un sistema de carga independiente, la micro-turbina puede recargar las baterías en cualquier lugar y en cualquier

momento. De esta forma paliamos el mayor inconveniente en los vehículos eléctricos, que sería el rechazo por parte del usuario por falta de autonomía y los posibles inconvenientes de la recarga. Al poder utilizar la infraestructura actual de suministros de combustibles, elimina los problemas que plantea el montaje, el coste y la capacidad de las redes de carga.

Este tipo de turbina puede funcionar con combustibles renovables como el etanol y el biogás, lo que suavizaría la transición de la era de los combustibles fósiles a la movilidad eléctrica. Debido a la integración de la micro-turbina, se necesitarían menos baterías dentro del vehículo eléctrico, ahorrando peso y reduciendo costes, y, sobretodo, reduciendo la contaminación medioambiental.

2. Historia de la tecnología en automoción

Desde hace muchos años, se ha intentado conseguir una propulsión alternativa para los vehículos, cuya propulsión se realiza mediante combustibles fósiles. Los motores de combustión interna son conocidos desde finales del siglo XIX, ya sean mediante encendido por compresión (diésel) o mediante encendido provocado (gasolina). El caso de los motores de combustión se puede considerar un ejemplo claro de que la tecnología en muchos casos avanza por evolución, y no por un cambio radical. Hay escenarios perjudiciales como la contaminación, el coste de adquisición de la energía y la dificultad de transporte en las ciudades, que en la actualidad está llevando hacia una transición a un uso privado de los vehículos. El siguiente paso en esta evolución fue la propulsión híbrida. Un vehículo híbrido es aquel cuya tecnología de propulsión utiliza dos tipos diferentes de energía de forma individual o combinada. La combinación más habitual utilizada en los vehículos es la que combina un motor de gasolina con otro eléctrico. La última evolución es la propulsión eléctrica, en la cual solo se utilizan motores eléctricos y baterías. Pero la propulsión eléctrica tiene un problema, la autonomía, por lo tanto, se estudian diferentes medios para poder incrementarla, hasta que consigamos unas baterías de alta densidad eléctrica, mediante los llamados extensores de rango.

Los automóviles nacieron en Gran Bretaña y Estados Unidos a finales del siglo XVIII, con el fin de agilizar la movilidad urbana, sustituyendo así a los carruajes de caballos. Estos vehículos, con el tiempo, han ido evolucionando gracias a diversas mejoras, hasta llegar al actual coche eléctrico.

2.1. El comienzo del automóvil

Al comienzo, los automóviles de vapor eran la tendencia, aunque se empleaban mayormente para transportar artillería pesada. El modelo sucesor, fabricado en 1771, está expuesto en el Museo Nacional de la Técnica de París. Con la sucesión de los años, se fueron introduciendo el freno de mano, la caja de cambios y el volante, aunque el calor que producía la caldera obligó a buscar un sustituto líquido, que sería el aceite, para, más tarde, ser propulsado por gas de carbón y, por último, por gasolina.

El inicio del automóvil, tal y como lo conocemos hoy en día, se produjo en Mannheim, en 1885, con el primer modelo de Karl Benz, el Benz Patent-Motorwagen, un coche que empezó a producirse en 1888. Poco después, en 1889, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, se sumaron con sus propios diseños [6].

2.2. El intento de coche eléctrico en 1800

El coche eléctrico no es una novedad actual, sino que su origen tiene lugar en la década de los años 30 del siglo XIX [7], siendo incluso, antecesor de los primeros vehículos de combustión.

Los primeros prototipos de los coches eléctricos que empezaron a aparecer, están basados en investigaciones y trabajos que llevó a cabo Michael Faraday sobre el electromagnetismo [8], aunque realmente no se conoce quién fue el inventor como tal del coche eléctrico de la historia. En aquella época detectaron, como nosotros con los coches eléctricos actuales, que una de las principales ventajas de este tipo de automóviles era que son menos pesados y muy silenciosos, pero también se cercioraron de que la principal desventaja era su limitada autonomía, una gran desventaja frente a los coches de combustión y muy posiblemente el principal motivo por el que la transición hacia el coche eléctrico se está retrasando tanto, en la que aún seguimos investigando en la actualidad.

2.3. Progreso y evolución de la gasolina

En 1910, los coches eléctricos eran los más vendidos [9], pero la industria de los vehículos de gasolina, sobretodo en Estados Unidos, creció debido a diversos factores:

- Combustible más barato
- Mejora de las redes y firmes de las carreteras
- Implantación del motor de arranque, ya que antiguamente era muy aparatoso arrancar un coche de combustión

Fue en 1908, con motivo al Ford T, creando la primera producción en cadena de un coche por Henry Ford, cuando el vehículo eléctrico dejó de ser la opción preferida por el consumidor. Ya el

único motivo no era que el combustible fuese más barato, sino también el coche gracias a esta producción en cadena.

A partir de ese momento se frenó y se dejó a un lado el desarrollo tecnológico del coche eléctrico y desarrollándose más los coches de combustión. A partir de la década de los 70 volvió a tomar fuerza el desarrollo de coches eléctricos debido a la gran crisis del petróleo y al comienzo de una tendencia que mirara más por el medio ambiente. Sin embargo, las presiones comerciales de la industria petrolífera desbarataron cualquier posibilidad de recuperación del desarrollo del coche eléctrico.

Hoy en día, podemos observar cómo han empeorado los problemas económicos y medioambientales a causa del consumo de combustibles fósiles, por lo tanto, se ha vuelto a impulsar el desarrollo y la inversión en los coches eléctricos para agilizar esta transición hacia lo eléctrico.

2.4. Un transporte para todos los públicos

El fácil uso y la buena integración del automóvil se debió, en gran medida, gracias a las siguientes características:

La técnica: Integración del encendido eléctrico del motor, mientras las dos válvulas son controladas por el árbol de levas, incorporación de los radiadores de panal, el eje cardán y las llantas con neumáticos, patentados por John Boyd Dunlop [10], que los había inventado para ser usadas en bicicletas, y diseñados en su primera versión por los hermanos Michelin. Y, por último, el volante o cremallera de dirección desbancó definitivamente a la barra fija.

El avance más importante fue el motor de arranque, que reemplazó al arranque con manivela, causante de fuertes lesiones [11], así como la aparición del freno hidráulico, dando lugar a un indispensable frenado uniforme en cada eje.

Los constructores: En Francia, los fabricantes más importantes al inicio fueron Panhard et Levassor (1889) y Peugeot (1891), mientras que Estados Unidos tiene a Henry Ford (1908) que, con su cadena de producción y montaje, logra una fabricación rápida y barata, alcanzando cifras hasta entonces inimaginables.

También nos encontramos en la misma época a Oldsmobile y Cadillac, antecesores de lo que después sería General Motors, y Dodge Brothers, dando lugar al nacimiento de la conocida Chrysler.

Los alemanes tenían por aquel entonces a Daimler-Motoren-Gesellschaft (Stuttgart), responsables de la fabricación de los primeros automóviles Mercedes, y Benz & Cie, fabricante de los vehículos Benz (Mannheim), que se fusionarían años más tarde para formar la puntera y exitosa marca Mercedes-Benz.

En el año 1899 se fundó en Turín Fiat, actual dueña de Ferrari, seguida posteriormente por Lancia y Alfa Romeo.

Los franceses, en 1898, crean la sociedad Renault Frères, que hoy en día, es junto a Peugeot y Citroën, la imagen de Francia en cuanto a automoción se refiere.

Es en este contexto histórico, cuando tres hombres del sector de la automoción coincidieron, aportando ideas muy innovadoras:

- Henry Ford, que logró que el automóvil de combustión se hiciese popular. El Ford T se estuvo produciendo con éxito durante 20 años sin ninguna modificación destacable a un precio muy asequible y que se fue reduciendo a medida que la producción aumentaba.
- Henry Royce, quién fabricó un vehículo en el que cuidaba el más mínimo detalle, con una calidad única y diferenciadora entre el resto de coches. Royce llegó a un acuerdo con Charles Rolls para que le suministrara chasis, formado así la actual y lujosa firma Rolls-Royce.
- Ettore Bugatti, quién creó su primer modelo completamente mecanizado con una grandísima precisión. Bugatti es el padre de la tecnología de vanguardia en la automoción, teniendo en su actual catálogo coches de más de 1000 CV.

La competición: Las primeras competiciones oficiales y carreras de coches nacieron a finales del siglo XIX, siendo una categoría en la que se pudo experimentar rápidos progresos y descubrimientos que más adelante se implantarían en los coches de uso particular.

2.5. Tipos de motores

En las máquinas térmicas, tenemos un límite absoluto para el rendimiento, siendo una máquina imaginaria, perfecta y reversible, cuyo proceso de funcionamiento se conoce como ciclo de Carnot. Este rendimiento se encuentra por debajo del 100%, siendo un máximo físico, absoluto y universal, siendo imposible superarlo mediante la tecnología, dependiendo de la temperatura máxima y mínima entre las que trabaja. En el caso de motores de combustión que queman hidrocarburos podemos considerar una temperatura mínima (que sería la del ambiente) de 17 °C (290 K) y una máxima de 1570 °C (1843 K). Esta combinación de temperaturas nos daría un rendimiento teórico máximo de un 84.3%. El calor generado por el motor de un coche convencional se traduce en pérdidas de un 60% en los motores diésel y de un 70% en un motor de gasolina, teniendo unos rendimientos finales de entre el 30 y el 40% en motores diésel y entre el 20 y 30% en motores de gasolina. Los motores eléctricos al no ser máquinas térmicas, su rendimiento es superior al 90% [12].

2.5.1. Motores de gasolina

Los motores de gasolina producen energía mecánica directamente consumiendo y transformando la energía química de la gasolina en energía mecánica. La ignición de este combustible mediante una chispa, producida por el electrodo de una bujía, produce un aumento de la temperatura del gas, que, seguido de una expansión de los gases de combustión, provoca finalmente el movimiento del pistón y, por consiguiente, el movimiento del coche. Por esto, también se conoce a estos motores como motor de explosión.

Existen motores de gasolina de dos tiempos (1 vuelta de cigüeñal), que se utilizan en la actualidad en motos de baja cilindrada, y de cuatro tiempos (2 vueltas de cigüeñal), que son los que se utilizan en los vehículos actuales. El ciclo termodinámico que se aplica es el denominado Ciclo Otto.

El ciclo Otto, (*Figura 7*), es un ciclo termodinámico ideal que supone que la absorción de calor ocurre instantáneamente mientras que el pistón está en el punto muerto superior. Ver diagramas. El ciclo consta de cuatro procesos, el proceso 1-2 es una compresión isoentrópica del aire, cuando el pistón evoluciona desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior. En el proceso 2-3 el aire absorbe el calor a volumen constante desde una fuente externa, mientras el pistón en el punto muerto superior. Este proceso representa la ignición de la mezcla aire-combustible y la combustión rápida consiguiente. El proceso 3-4 es una expansión isoentrópica (carrera de

trabajo). El ciclo se completa con el proceso 4-1 a volumen constante, en el cual el aire cede calor mientras el pistón está en el punto muerto inferior.

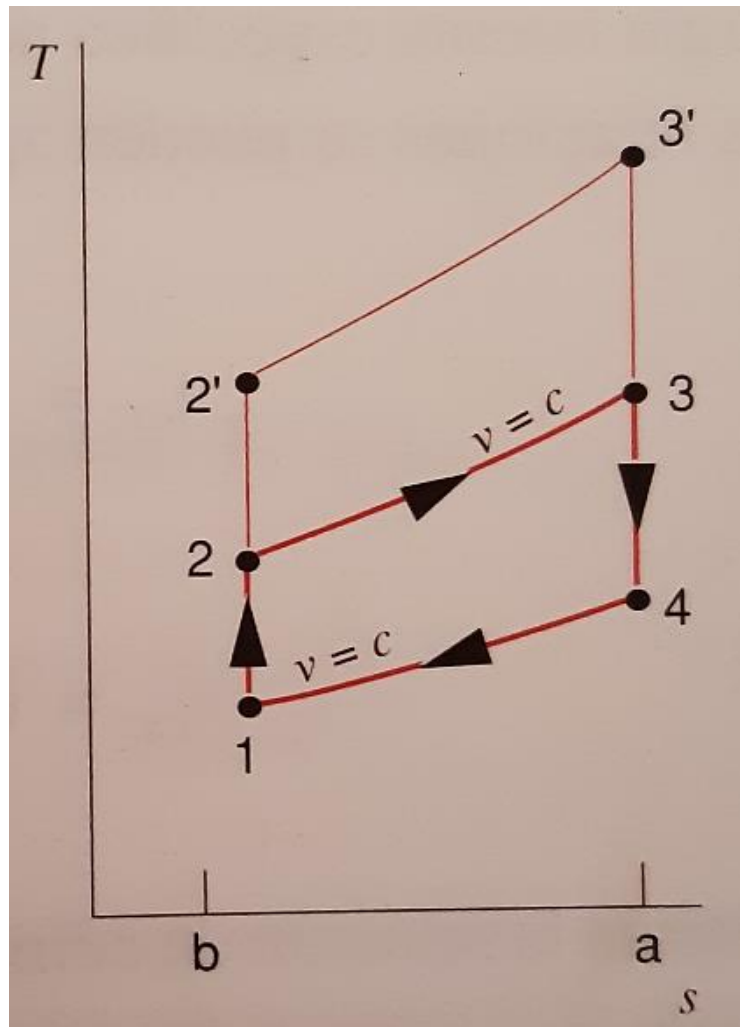


Figura 7: Diagrama T-s ciclo Otto

Las reacciones provocadas por la chispa inicial hacen que se encienda una mezcla de combustible vaporizado gracias a un inyector que lo pulveriza y aire comprimido dentro de la cámara de combustión. Esta mezcla combustiona rápidamente, expandiéndose y provocando el movimiento del cilindro que a su vez mueve el cigüeñal, produciendo así energía que se transforma en movimiento.

2.5.2. *Combustibles alternativos: el gas*

Los gases son los combustibles fósiles menos contaminantes para el medioambiente [13], siendo mínimas las emisiones.

- **Gas licuado del petróleo (GLP):** También llamado vulgarmente autogás, es una mezcla de gas butano y propano que se consigue a partir de gas natural y petróleo. Su poder calorífico es superior al de la gasolina, y su precio es atractivamente más bajo.
- **Gas natural comprimido (GNC):** Se trata de gas natural almacenado a altas presiones. El poder calorífico del GNC es menor al del GLP, aunque su obtención es más económica ya que solo se trata, como he dicho antes, de gas natural.
- **Gas natural licuado (GNL):** Se trata de gas natural en estado líquido, criogenizado a $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al ser líquido, ocupa menos espacio, por lo que se suele utilizar en transportes pesados y para cubrir largas distancias.

2.5.3. *Motores diésel*

El ingeniero alemán Rudolf Diesel, en 1893, inventó el motor diésel, que funcionaba con un combustible poco volátil, conocido como aceite liviano o fueloil, el cual era utilizado para alumbrar las calles con lámparas que lo usaban [14]. Al igual que los motores de gasolina, los motores diésel funcionan en cuatro tiempos, pero la principal diferencia la encontramos en cómo se produce la combustión.

Los motores diésel no usan chispa, es decir, no tienen bujías, ya que la combustión se produce al comprimir el combustible pulverizado junto al aire tomado por el motor. Gracias a esto, los motores diésel son mucho más eficientes que los motores de gasolina con la combustión por explosión [14]. Los principales inconvenientes son que las averías de estos motores son mucho más caras de reparar y producen una mayor contaminación al medio ambiente ya que se trata de un combustible más sucio.

2.5.4. Motores alternativos

Vehículos híbridos: Los coches híbridos consisten en la combinación de un motor de combustión interna, siendo este de gasolina o diésel y un motor eléctrico, normalmente, pudiéndonos encontrar dos tipos dos tipos: el híbrido puro, cuyo motor eléctrico puede funcionar en solitario hasta ciertas velocidades o demandas de aceleración mientras tenga suficiente batería, y el híbrido enchufable, que, además de poder funcionar como el híbrido puro, puede circular en modo eléctrico, independientemente de la velocidad, unas distancias que dependen de la autonomía de la batería hasta que esta se quede sin energía, que sería cuando entraría en funcionamiento el motor de combustión.

En los vehículos híbridos se usa principal el motor eléctrico de modo que se pueda optimizar consumo de combustible y así reducir las emisiones.

Además, disponen de frenada regenerativa, que consiste en un generador que recupera energía con la frenada, con la propia inercia del coche al dejar de acelerar o en determinadas fases de la aceleración cuando no se aprovecha todo el rendimiento del motor de combustión.

Vehículos eléctricos: Consiste en un automóvil propulsado por uno o más motores eléctricos, normalmente uno por rueda, que consumen la energía eléctrica almacenada en baterías recargables y la transforma en cinética, dando movimiento al vehículo. A distinción de los vehículos con motores de combustión interna, un coche eléctrico, si miramos solo lo que incluye el coche, no emite ningún tipo de emisiones, ya que, como hemos dicho antes, solo es propulsado mediante la electricidad que utilizan los motores eléctricos.

Vehículos REX (Extensor de rango o rango extendido): Son vehículos idénticos a los vehículos eléctricos, pero con su principal desventaja solucionada, la autonomía. Estos vehículos consiguen ampliar la autonomía reduciendo la cantidad de baterías, pero añadiendo un sistema generador de electricidad, haciendo que el vehículo sea más ligero, con lo cual consumiría menos [15]. Estos extensores de rango podrían ser un motor de gasolina produciendo electricidad en vez de propulsar el coche [16], una celda de combustible, que tienen como inconveniente que es una tecnología cara de implementar, a día de hoy, como veremos más adelante, o una micro-turbina de gas (objeto de estudio) [17], la cual podría consumir gas natural, hidrógeno o biogás, haciendo que las emisiones fueran nulas y la generación de electricidad fuera limpia. El esquema de funcionamiento sería el siguiente: el motor eléctrico propulsaría el coche usando la electricidad almacenada en la batería, la cual podría ser cargada mediante un enchufe igual que los coches

eléctricos o, en caso de no poder acceder a ello, mediante el extensor de rango que iría consumiendo combustible de un depósito incorporado en el coche. Con estos vehículos podríamos conseguir autonomías de 800 kilómetros en vez de los escasos 450 kilómetros de los coches eléctricos convencionales, tal y como nos confirma Claire Soares en su libro [3], y que de momento solo ha conseguido Tesla.

2.6. Implantación de la micro-turbina de gas en automóviles

La micro-turbina de gas es una tecnología adecuada para su implementación en automóviles debido a 3 características principales: su bajo peso, bajo mantenimiento, ya que es escaso debido a las pocas partes que las componen y el bajo precio de su mantenimiento causante de la cantidad de kilómetros que se pueden hacer antes de tener que realizarlo (500.000 kilómetros), y su longevidad.

Esta tecnología, como se ha comentado anteriormente posee mucho potencial, pero hasta ahora no se había aplicado de forma óptima, es decir, utilizándola como motor extensor de rango y no como fuente de propulsión por sí misma. Como prueba de ello, echemos un vistazo al pasado, donde todas las aplicaciones de implantación que se intentaron fueron como medio de propulsión del vehículo.



Rover Jet1 (1949)

Basado en un Rover 75 de la época, pesaba 1.270 kg y usaba una turbina de doble escalón que desarrollaba 200 CV a 40.000 rpm. Alcanzaba 240 km/h.



Rover BRM (1963)

Podría describirse como una versión de competición y muy evolucionada del Rover Jet1, propulsada por una turbina de un solo escalón que entregaba alrededor de 150 CV; suficientes para alcanzar 229 km/h.



Chrysler Turbine (1963)

Se construyeron 55 unidades propulsadas por una turbina de gas que entregaba 130 CV a 36.000 rpm. Contaba con una caja de tres marchas, y alcanzaba 192 km/h de punta.



Lotus 56 (1968)

Este Lotus de tracción total empleaba una turbina industrial Prat&Witney con tres escalones de compresión y que desarrollaba unos 430 CV, acoplada al sistema de tracción a las cuatro ruedas mediante un embrague viscoso.

3. Estado del arte de micro-turbinas

3.1. Micro-turbinas en la actualidad

Como hemos visto anteriormente, propulsar un coche mediante una turbina de gas ha sido un objetivo que la ingeniería ha soñado desde que los primeros ejemplares de estos equipos empezaran a instalarse en aviones comerciales y de combate. En el mundo de la automoción, las turbinas de gas tenían que cumplir un cometido digno de su tecnología y utilidad, esta oportunidad de brillar una vez más viene dado del uso de la misma como extensor de rango. Estos equipos son micro-turbinas que accionan unos generadores eléctricos cuya meta es abastecer de energía eléctrica las baterías de un vehículo eléctrico cuando se requiera, de manera que pueda seguir circulando. A un extensor de rango lo único que se le pide es un trabajo muy sencillo: girar de forma permanente, eficiente y silenciosa a un régimen de giro constante, de esta manera es cuando la micro-turbina, en esas condiciones de funcionamiento, puede destacar.

En Rusia, en el año 2010, a medida que aumentaba el número de vehículos de motor y la consiguiente contaminación por los gases de escape, la necesidad de un transporte público ecológico y rentable era una prioridad para los gestores del transporte urbano. Los autobuses y los tranvías son una parte integral de la red de transporte público de Rusia, pero carecen de la capacidad para satisfacer la demanda de transporte del país. Para ello, desarrollaron el autobús ECObus-5250 de Trolza (*Figura 8*). El ECObus combina la maniobrabilidad de un autobús tradicional y la potencia continua sobre la marcha de un tranvía. En lugar de depender de la electricidad de los servicios públicos o de un motor de combustión interna para obtener energía como muchos híbridos, este autobús eléctrico funciona completamente con baterías cargadas por una micro-turbina Capstone C65 a bordo. El ECObus-5250, desarrollado por CJSC Trolza, es el primer autobús eléctrico de Rusia con extensor de rango. Alimentado por gas natural almacenado en depósitos de gas a bordo, la micro-turbina recarga las baterías que se han descargado parcialmente, lo que permite que el autobús continúe rodando silenciosamente y sin problemas por las calles de la ciudad sin detenerse para recargar las baterías. La micro-turbina C65 de Capstone, para aplicaciones de este tipo, es capaz de funcionar con una amplia variedad de combustibles comercialmente viables, que incluyen, entre otros, gas natural, gas metano, etc... Independientemente del tipo de combustible, los atributos ambientales de ECObus cumplen con los estrictos estándares de emisión Euro-4 de aquel año, ya que el escape de las micro-turbinas Capstone no contiene más de 9 ppm de NOx y CO.

Las características ecológicas de las micro-turbinas incluyen niveles de ruido silencioso (60 - 70 db) y bajas emisiones de NOx y CO, lo que hace que el ECObus sea ideal para áreas turísticas y ciudades densamente pobladas donde el transporte limpio y tranquilo es una prioridad. En comparación con los autobuses tradicionales, las emisiones de ECObus son 12 veces menores que los autobuses tradicionales alimentados con diésel y de seis a ocho veces menores que los autobuses con motores alternativos de gas. La eficiencia de combustible de un vehículo de este tipo implementado por Capstone es de un 40 a un 80 por ciento más alta que los vehículos de transmisión convencionales. Además, los costes de mantenimiento de un vehículo con micro-turbinas Capstone pueden ser 70 por ciento más bajos que los de un motor convencional. El ECObus reduce el consumo de combustible, las emisiones y el mantenimiento, y, además, no compromete la comodidad de los pasajeros. Usando un circuito de calefacción, la energía térmica de la micro-turbina se usa eficientemente para calentar el compartimiento de pasajeros, lo que elimina la necesidad de un sistema de calefacción autónomo. El mero zumbido de la micro-turbina debajo del piso no supera los 60 dB, que es similar al nivel de ruido silenciado de un tranvía. Además, la baja vibración de la micro-turbina garantiza una comodidad aún mayor. El equipo compacto de la micro-turbina permitió a los diseñadores de ECObus ahorrar espacio y aumentar el tamaño del compartimiento de pasajeros, que puede transportar cómodamente a 95 pasajeros. Los ECObuses actualmente se implementan en grandes ciudades y centros turísticos rusos en el sur de Rusia.



Figura 8: Autobús Trolza con micro-turbina

En el año 2011, la prestigiosa marca de coches Jaguar, fabricó un prototipo llamado Jaguar CX-75 (*Figura 9*). La intención de Jaguar era fabricar en serie unas 250 unidades anuales de este vehículo, pero debido a la crisis, este proyecto se quedó sin desarrollar [18]. El CX-75 era un vehículo eléctrico formado por un motor eléctrico en cada rueda, haciendo un total de cuatro motores, que en conjunto producían unos 778 CV de potencia. Estos motores funcionaban gracias a la alimentación proporcionada por un paquete de baterías de tan solo 15 kWh de capacidad, suficientes para dar una autonomía de 50 km. Esta batería se recargaba mediante dos micro-turbinas del fabricante Bladon Jets, de 70 kW en total de potencia y alimentadas por gasóleo. Jaguar confirmó que estas pequeñas micro-turbinas eran tan eficientes que el CX-75 podía desplazarse en modo 100% híbrido cumpliendo la homologación vigente en cuanto a emisiones de CO₂ de sólo 150 gr/km.



Figura 9: Jaguar CX-75

En el año 2014, Walmart, la empresa americana minorista con una gran red de supermercados, presentó un camión al que llaman en camión del futuro. El Wave (Walmart Advanced Vehicle Experience) Tractor (*Figura 10*) es un camión propulsado por un motor eléctrico y provisto de una de micro-turbina que funciona como extensor de rango. El conjunto camión-remolque tiene unas características aerodinámicas muy dispares a las habituales en estos vehículos y está constituido de una cabina con una gran superficie de cristal que mejora la visibilidad del conductor. Posee una estética futurista, pero cabe destacar su sistema propulsor, eléctrico con extensor de rango, y por la variedad de tecnologías en componentes auxiliares y

sistemas de control que lo componen, consiguiendo una alta eficiencia. Para realizar este proyecto, Walmart ha contado con ayuda de empresas como *Peterbilt*, *Great Dane Trailers* y *Capstone Turbine* y múltiples proveedores externos. Los modelos definitivos se presentan con un motor de tipo micro-turbina de reducidas dimensiones, pudiendo funcionar con gas natural comprimido y biocombustibles. Este sistema permite reducir el tamaño de la batería que, para estos vehículos de grandes dimensiones, ocupa mucho espacio y supone un peso extra elevado, suponiendo que esta clase de vehículos ya pesan bastante por sí mismos. Sus emisiones son muy bajas y no es necesario tratar los gases de escape mediante un catalizador como los camiones diésel actuales. Además, como se ha comentado anteriormente, el mínimo número de piezas móviles que componen las micro-turbinas, disminuyen bastante los costes de mantenimiento y refrigeración, además de reducir su peso. Al trabajar siempre por diseño en su punto óptimo de funcionamiento la eficiencia de la micro-turbina es máxima. La batería ha sido desarrollada por la empresa canadiense *Corvus Energy* y es de tipo ión-litio. Está compuesta por 7 módulos y su capacidad total es de 45,5 kWh. Además, incluye un sistema de frenado regenerativo y elementos de control.



Figura 10: Camión Walmart con micro-turbina

Modos de funcionamiento:

Modo de carga: Cuando los sistemas del camión detectan un nivel bajo de carga en la batería (por debajo del 50%) la micro-turbina arranca y comienza a recargar la batería. También incorpora una opción en la que la recarga permanece activa, dejando funcionar la micro-turbina hasta que el paquete de baterías se recargue al completo.

Modo eléctrico: Siempre que la batería se encuentre por encima del 50%, el funcionamiento del camión podrá ser completamente eléctrico en vías urbanas.

Modo combinado: La micro-turbina permanece encendida y abastece de energía al sistema de baterías para que éstas a su vez accionen el motor eléctrico.

En el año 2016, la empresa Techrules, una nueva compañía China de investigación y desarrollo automotriz, ha creado un sistema extensor de rango mediante carga por turbina (TREV), siendo una tecnología de vanguardia con aplicación a vehículos eléctricos que incluye un generador de micro-turbina. Este sistema aumenta el rango de autonomía utilizando una micro-turbina de gas para generar electricidad. Esta electricidad se utiliza para recargar las baterías que impulsan las ruedas mediante motores eléctricos. El sistema permite disponer de un menor número de baterías gracias al poder de recarga, obteniendo como resultado un menor peso y todo ello, ocupando menos espacio. La potencia máxima obtenida del vehículo al que se va a implantar este sistema es de 768 kW (1.044 CV), los ensayos iniciales presentan unas grandes prestaciones (0-100 km/h en 2,5 segundos con una velocidad máxima limitada a 350 km/h) y un excelente rango de autonomía (más de 2.000 km), presentado un consumo de 0.18 l / 100 km a plena carga.

TREV es un sistema de propulsión totalmente nuevo. Se compone de un generador accionado por una micro-turbina aero-derivada y de generación de energía a gran escala. La turbina acciona un generador que carga el paquete de baterías que, a su vez, proporcionan la electricidad necesaria para alimentar los motores eléctricos. A diferencia de otros intentos del pasado con sistemas de turbina, no hay alimentación eléctrica directa desde el generador a los motores eléctricos. El aire que necesita la micro-turbina para su correcto funcionamiento pasa por un regenerador, donde la temperatura del gas de escape se transfiere al aire de admisión comprimido. La combustión de la mezcla de aire y combustible genera energía, provocando la expansión del gas de la combustión

a altas velocidades a través de los álabes de la turbina. En este diseño, la turbina y el generador comparten el mismo eje, girando a una velocidad aproximada de 96.000 rpm. El conjunto formado por micro-turbina, inversores, bombas de combustible, bombas de aire, y el generador, pero sin incluir las baterías y motores de este sistema tiene un peso aproximado de 100 Kg. En la *Figura 11* podemos ver a Matthew Jim, CEO de la empresa Techrules, junto a la micro-turbina desarrollada.

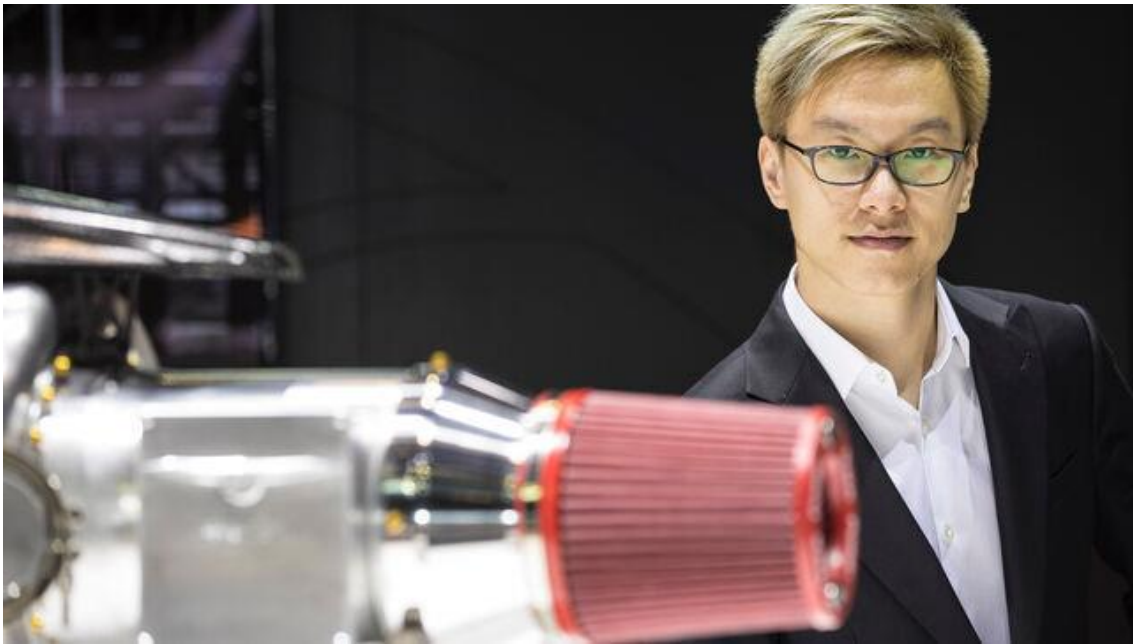


Figura 11: Matthew Jim, Director de tecnología de Techrules junto a su micro-turbina

Como consecuencia de las altas velocidades de giro del rotor y para evitar las pérdidas mecánicas por fricción, se utiliza un sistema consistente en inyectar aire a presión en los cojinetes, así evitamos la utilización de aceites lubricantes. Gracias a este diseño, se obtiene un menor número de pérdidas por fricción, eliminando así los rozamientos de un cojinete mecánico. Junto a este sistema, interactúa el campo magnético del alternador que ayuda a centrar de forma precisa el eje, manteniendo así una gran estabilidad dinámica del conjunto, en forma de cojinete magnético. Todo esto supone un alargamiento de la vida útil del conjunto.

En las primeras pruebas, el alcance del futuro superdeportivo es de tan solo 150 kilómetros funcionando únicamente con las baterías. Esta nueva tecnología, puede recargar las baterías en cualquier momento, ya sea durante la conducción o con el coche sin funcionamiento. El alcance

máximo de este vehículo estaría aproximadamente alrededor de 2.000 km con un depósito de 80 litros. El sistema permite funcionar con una amplia gama de combustibles, como serían: gas natural, biogás, gasolina, gasóleo y queroseno de aviación. De este sistema se obtiene una eficiencia muy alta, bajas emisiones y está sellado de por vida, teniendo muy bajo mantenimiento de por vida, siendo el único elemento de recambio el filtro del aire de entrada a la micro-turbina.

El chasis principal del vehículo se basa en una estructura monocasco de fibra de carbono para asegurar una muy buena rigidez torsional y seguridad a los pasajeros. También dispone de un subchasis trasero, el cual carga con componentes como el generador de micro-turbina y sus sistemas auxiliares directos, así como los sistemas de refrigeración líquida para los motores de tracción y la batería eléctrica.

Este vehículo para su carga, es capaz de utilizar las redes eléctricas procedentes de fuentes renovables y hace viable la carga en casa. Dispone una batería longitudinal en forma de T que recorre la columna central del coche en su parte inferior.

La intención del fabricante es producir y vender en volúmenes bajos este superdeportivo en los próximos años. Posteriormente de su lanzamiento, la idea de Techrules, es producir con esta tecnología vehículos compactos en masa. En la *Figura 12* podemos observar el automóvil en versión prototipo del vehículo a desarrollar junto con esta tecnología.



Figura 12: Techrules GT96 Concept

Especificaciones Techrules GT96:		
Potencia máxima:		768 kW (1030 CV)
Par de fuerza a las ruedas	Delantero:	2880 Nm
	Trasero:	5760 Nm
	Total:	8640 Nm
	Aceleración (0-100 km/h):	2.5 segundos
	Velocidad máxima:	350 km/h
	Consumo de combustible:	0.18 l/100km
Transmisión	Número de velocidades:	1
Paquete de baterías	Voltaje:	720 V
	Tipo de batería:	Li-Mn Hybrid IMR
	Capacidad:	20 kWh usable
	Refrigeración:	Líquida
Chasis	Construcción:	Monocasco de fibra de carbono
	Suspensión delantera:	De doble brazo
	Suspensión trasera:	De doble brazo
	Ruedas delanteras:	265/35/R20
	Ruedas traseras:	325/30/R20
Dimensiones	Longitud:	4648 mm
	Anchura:	2034 mm
	Altura:	1140 mm
	Distancia entre ejes:	2655 mm
	Ejes delantero y trasero:	1740 mm / 1653 mm
	Peso en seco:	1380 kg
Frenos	Delanteros:	Discos ventilados de 405 mm y 34 mm de ancho pinzas de seis pistones
	Traseros:	Discos ventilados de 380 mm y 28 mm de ancho con pinzas de cuatro pistones

Tabla 1: Especificaciones técnicas Techrules GT96

En el año 2017, el GT96 (*Figura 13*) fue presentado en el salón del automóvil de Ginebra. El diseño final del superdeportivo ha sido realizado por los mundialmente famosos diseñadores de automóviles Fabrizio y Giorgetto Giugiaro. TechRules delegará como responsable de producción al estudio de Ingeniería LM Gianetti, que tiene previsto comenzar la producción de hasta 25 unidades por año durante 2018 en su planta de Turín, Italia.



Figura 13: Tchrules GT96

En el año 2019, Tchrules ha realizado importantes inversiones, y el Doctor Ching Chuen Chan, experto con reconocimiento mundial en vehículos eléctricos, supervisa el centro de investigación y desarrollo de Tchrules en Pekín, donde se está desarrollando una micro-turbina más pequeña de 15 kW, convirtiéndola así en aplicable para usarla en vehículos eléctricos. Por lo tanto, con esta estrategia, han decidido enfocar su cartera de productos a versiones más pequeñas y económicas, pensando en una fabricación de gran serie y en un futuro catálogo de diferentes modelos de vehículos. Tchrules, para poder tener una infraestructura en la que poder apoyarse a la hora de vender sus productos, enfocará su producción para suministrar el sistema TREV a estaciones de carga fijas y móviles, y lo proveerá a diversos fabricantes para su uso en vehículos comerciales y en turismos. Con la gran acogida masiva de estas pequeñas micro-turbinas en vehículos eléctricos, la mayor problemática del vehículo eléctrico podría solventarse. Esta micro-turbina, al igual que su hermana mayor, puede funcionar con combustibles renovables, como el etanol y el biogás, lo que facilitaría la transición a los vehículos eléctricos.

A la vista de que la tecnología para construir extensores de rango basados en micro-turbinas comienza a estar disponible, los principales constructores interesados en aplicar esta tecnología son los fabricantes de vehículos eléctricos, ya que los fabricantes tradicionales, a excepción de

algunos, están optando de momento por motores convencionales de cada vez más baja cilindrada, por lo tanto, para ellos no tiene ningún sentido invertir en desarrollar turbomáquinas para hacer el mismo trabajo. Algo que sí está cada vez más claro es que hay más proveedores ofreciendo micro-turbinas para este tipo de aplicación. Por ejemplo, como hemos comentado con anterioridad, la china Techrules, junto con Capstone, Bladon Jets, etc...Prácticamente todos los fabricantes de micro-turbinas para generación de electricidad están ansiosos por ofrecer una alternativa lista para ser instalada y usada en un coche eléctrico.

3.2. Principales fabricantes de micro-turbinas

El origen de las micro-turbinas de gas, se remonta a los años 60, empleándose como equipos generadores en la aviación, exactamente en los aviones comerciales. Las micro-turbinas parecen ser una opción viable para la implementación en sistemas de vehículos eléctricos. Las micro-turbinas tienen varias ventajas sobre otros motores térmicos (Wankel, MCIA o Célula de combustible), y las capacidades en términos de extensión de rango del vehículo eléctrico son potencialmente superiores.

Aspectos como tamaño geométrico, peso, costo, disponibilidad, y la facilidad de producción son características muy favorables para su viabilidad e incorporación comercial con respecto al resto de motores térmicos, tal y como nos dice Adam Head en su tesis doctoral [15].

3.2.1. Capstone

Capstone Turbine Corporation es el principal productor mundial de sistemas de energía de micro-turbinas altamente eficientes, de bajas emisiones y resistentes. Las micro-turbinas Capstone sirven a múltiples mercados verticales en todo el mundo, incluidos los recursos naturales, la eficiencia energética, las energías renovables, el suministro de energía crítico, el transporte y las microrredes. Capstone ofrece una línea completa de productos, que proporciona sistemas escalables que se centran en 30 kW a 10 MW que funcionan con una variedad de combustibles gaseosos o líquidos y son la solución ideal para las necesidades actuales de generación de energía distribuida.

Las características principales de las micro-turbinas de Capstone son:

- Ligeras y ocupan poco espacio.
- Refrigeradas y lubricadas por aire.
- Alternador asíncrono de alta frecuencia (45.000 a 96.000 rpm).
- Conversión AC-DC (Electrónica de potencia integrada).
- Emisiones ultra-bajas (9 ppm NOx).

- Periodos de mantenimiento cada 8.000h.
- 5 revisiones hasta overhaul.

Modelos y prestaciones

	CAPSTONE			
Modelo	C30	C65	C200	C1000
Potencia Térmica (kWt)	63	120	275	1375
Potencia Eléctrica Neta (kWe)	30	65	200	1000
Consumo Gas (kW)	115	224	606	3030
Rendimiento Térmico (%)	54,70%	53,57%	45,37%	45,37%
Rendimiento Eléctrico (%)	26%	29%	33%	33%
Rendimiento Global (%)	80'	82%	78%	78%
Emisiones de CO ₂ (g/kWh)	283,49	283,49	283,49	283,49
Emisiones de NOx (g/kWh)	0,29	0,208	0,18	0,18
Observaciones	Valores declarados para las microturbinas Capstone sin considerar tolerancias de consumo ni recuperación térmica. La producción eléctrica es neta a la salida del package descontando los autoconsumos internos.			

Tabla 2: Modelos y prestaciones micro-turbinas Capstone

Aplicaciones

Como hemos comentado con anterioridad, los vehículos eléctricos son limpios y eficiente, pero su mayor punto débil es la autonomía, la cual no permite recorrer largas distancias. Capstone utiliza estas micro-turbinas en vehículos eléctricos como extensores de rango, pudiendo recargar la batería en cualquier momento, lo cual disminuye el consumo de combustible, aportando un funcionamiento silencioso, reduciendo emisiones y una gran fiabilidad en su funcionamiento. Algunas de las actuales aplicaciones son: autobuses de transporte público, camiones para transporte pesado, vehículos eléctricos y coches súper deportivos.

3.2.2. Bladon Jets

Bladon Jets es pionero en el diseño, desarrollo y fabricación de micro-turbinas de gas (MTG), utilizando micro-turbinas de alta velocidad, ultra fiables y de combustión limpia, junto con tecnologías patentadas de intercambiadores de calor y cojinetes de aire, capaces de generar energía eléctrica de una forma portátil.

Características de las micro-turbinas de Bladon Jets:

- Revisiones una vez al año.
- Cero mantenimientos, sellado de por vida.
- Piezas de repuesto mínimas: revisiones sencillas y de bajo coste.
- Flexible en cuanto a combustibles, pero suelen usar diésel, queroseno, o combinaciones de los dos.
- Diseño robusto.
- Reducido impacto medioambiental.
- Bajo nivel de ruido.
- Ultra bajas vibraciones.

Prestaciones

PERFORMANCE	
Power Output	12kW
ENGINE	
Engine Type	Micro Gas Turbine
Operating Environment	Off-grid, back up, noise and emissions sensitive sites
FUEL OPTIONS	
Fuel Types	Diesel (EN509:2009), Kerosene (K1 Grade)
PHYSICAL SPECIFICATION	
Dimensions	210cm (L) x 101cm (W) x 140cm (H) Excluding exhaust flue
Weight	910kg including batteries as supplied & exhaust flue
Security	IP54 Ingress protection, Tamper proof doors. Remote monitoring and geo locking options.
EMISSIONS	
Noise	<65dB
Exhaust Emissions	EU Tier V emissions compliant
SAFETY	
Certification	ISO 19372:2015, CE Marked with TUV independent certification and type test
ENVIRONMENTAL RANGE	
Operating Conditions	-10 °C to +45 °C
Relative Humidity (%RH)	0-99
SERVICE AND WARRANTY	
Service Interval	Up to 8,000 hours**
Warranty	24 months or 5,000 running hours whichever comes first

Tabla 3: Características micro-turbina Bladon Jets

Aplicaciones

Bladon Jets es el primer fabricante mundial de micro-turbinas para el mercado de las telecomunicaciones. Hay más de 4 millones de torres de telefonía móvil en el planeta hoy y en crecimiento. Cada torre necesita energía de forma continua las 24 horas del día, los 365 días del año. La red de la red eléctrica no siempre puede ofrecer esta fiabilidad, especialmente en áreas remotas y mercados en desarrollo.

La micro-turbina de 12kW de Bladon Jets está diseñada para reemplazar a los grupos obsoletos grupos electrógenos diésel convencionales, ofreciendo un rendimiento superior y ventajas comerciales.

Bladon está llevando su micro-turbina (MTG) a la producción en cadena para su distribución en todo el mundo, con la consecuente bajada de precios que ello conlleva.

3.2.3. *Wrightspeed Powertrains*

Wrightspeed Powertrains, está diseñando sistemas de propulsión de vehículos eléctricos de rango extendido más eficientes. Buscan fabricar sistemas de calidad, creando micro-turbinas para representar una nueva era en la propulsión de vehículos, potenciando una nueva generación de flotas de vehículos más ligeras, silenciosas y más eficientes para las calles urbanas. Siguiendo la referencia de la industria aeroespacial, Wrightspeed Powertrains ha diseñado y fabricado un generador de micro-turbina para flotas de camiones comerciales. Hoy en día, su línea de productos insignia, The Route, se basa en un grupo motriz eléctrico de rango extendido (REV), que pretende marcar la próxima era de innovación en el transporte, utilizando su generador de turbina, Fulcrum. Al igual que los motores de turbina desplazaron a los motores de pistón en los aviones en la década de 1950, las turbinas están desplazando a los motores convencionales en aplicaciones REV, que van desde camiones de basura hasta autobuses públicos y camiones trailers (*Figura 14, Figura 15 y Figura 16*).

Ventajas de Wrightspeed Powertrain:

- El grupo motriz eléctrico Wrightspeed Route impulsa más torque en las ruedas que los motores diésel convencionales, con menos combustible, menos emisiones y menos ruido. La micro-turbina de a bordo, Fulcrum, elimina la preocupación por la autonomía.

- Ofrece los mayores beneficios en aplicaciones de servicio pesado con paradas frecuentes como camiones de basura, vehículos de reparto o autobuses. Dado que los motores de combustión de pistón tradicionales son menos eficientes al arrancar y parar, el Sistema de Wrightspeed puede lograr mejoras tan buenas como: Hasta un 67% de reducción en el consumo de combustible, hasta 63% de reducción en emisiones, y reducción de hasta 25.000 \$ en mantenimiento anual.

Aplicaciones y prestaciones

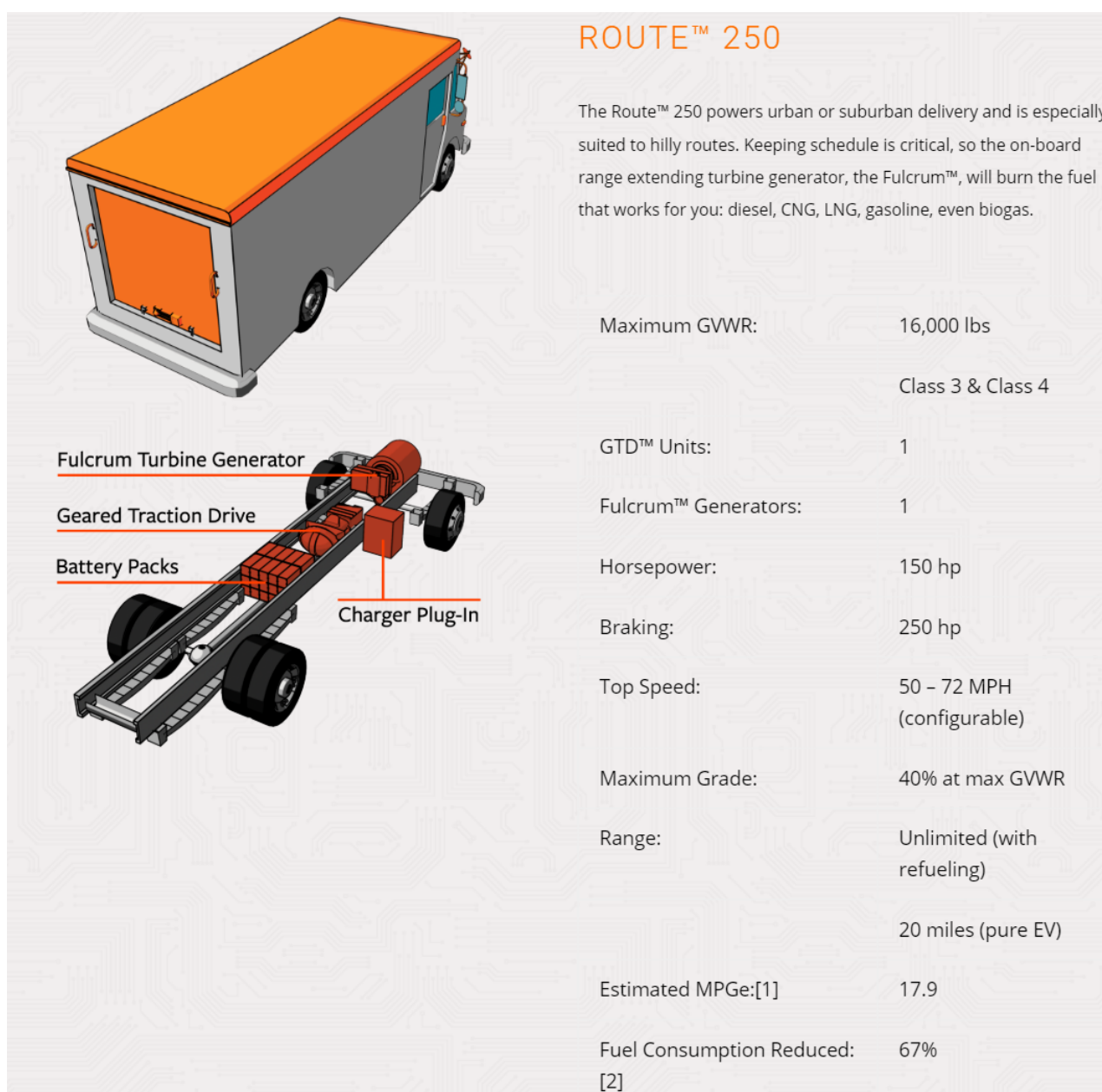


Figura 14: Route 250 Wrightspeed Powertrains

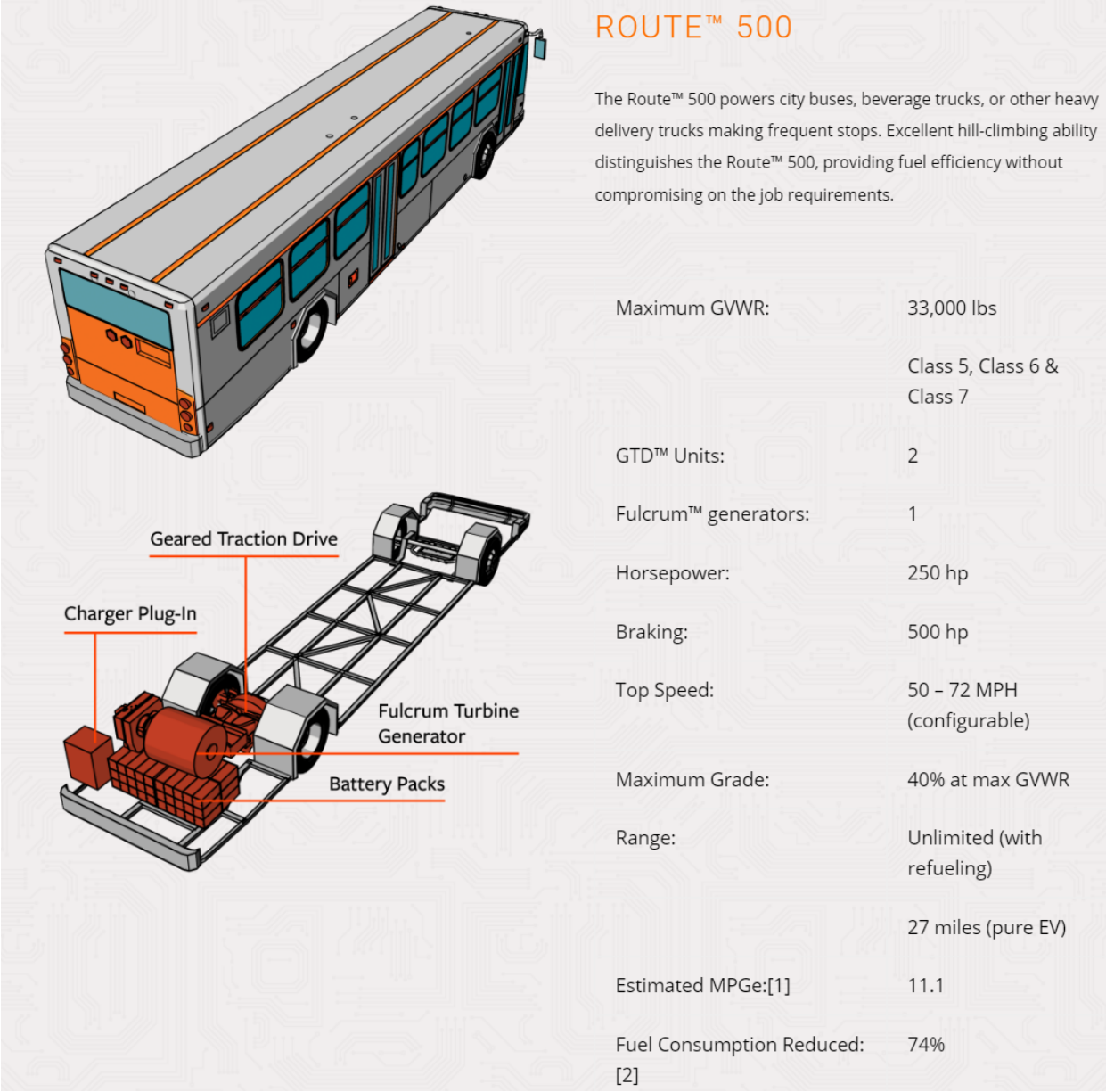


Figura 15: Route 500 Wrightspeed Powertrains

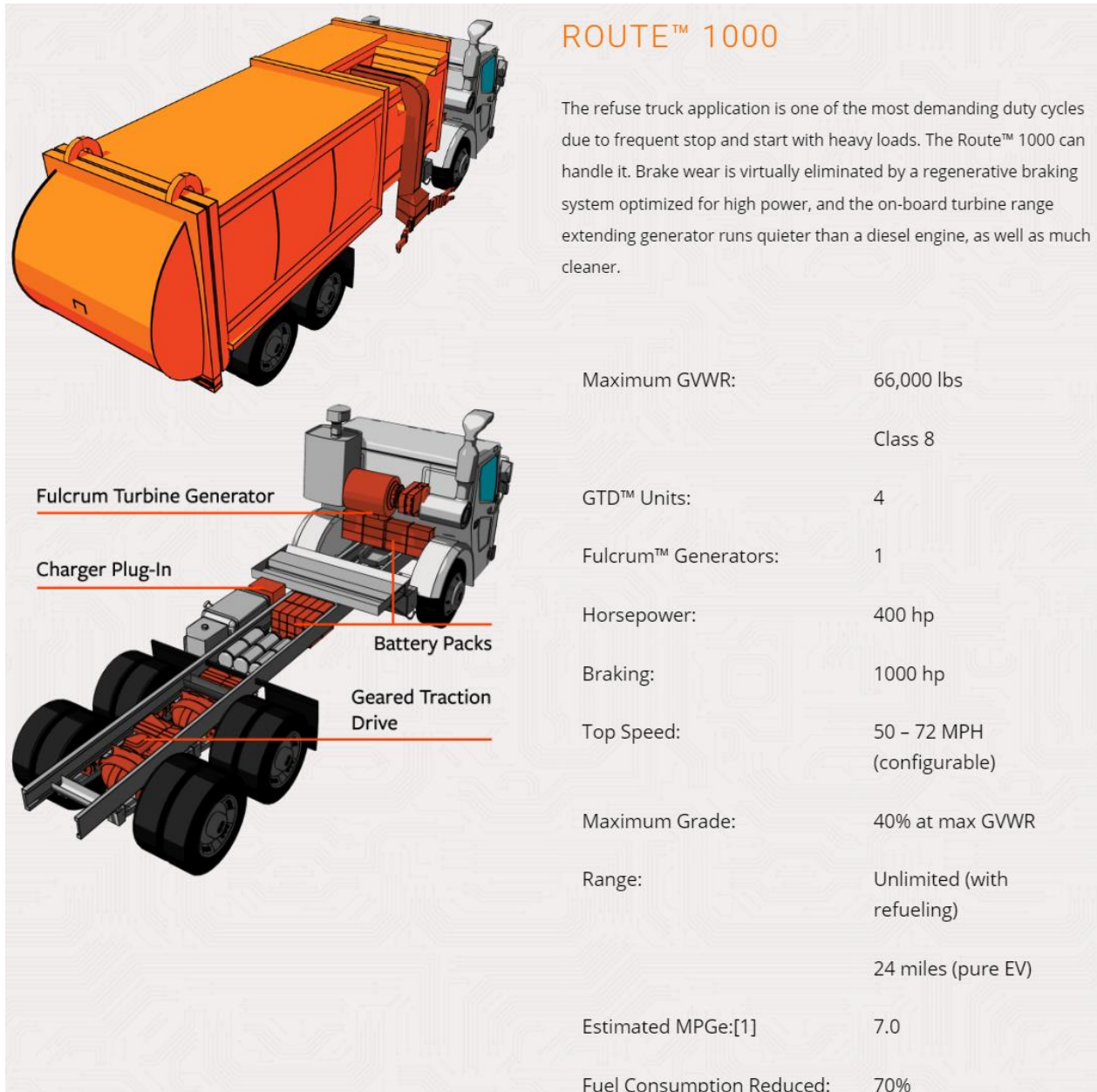


Figura 16: Route 1000 Wrightspeed Powertrains

3.2.4. *Ecojet Engineering*

EcoJet Engineering es una empresa australiana nacida de la colaboración entre Alexander Wright, James Kim (*Figura 17*) y Warren Day que comenzó en 2015 con un proyecto de Honores en la Universidad de Adelaida, que logró una de las ultra-micro-turbinas de gas (1 kW) más pequeñas del mundo, y actualmente, ha conseguido desarrollar una micro-turbina de gas de 20kW ligera y portátil. Esta micro-turbina está destinada a reemplazar los generadores diésel que normalmente se usan para proporcionar electricidad. La unidad solo pesa un 10% de lo que pesaría un generador diésel de combustión interna y puede configurarse para funcionar con diferentes combustibles, tanto líquidos como gaseosos. EcoJet quiere usar esta tecnología para llegar a fabricar un equipo comercial para los hogares y la industria del automóvil para complementar las tecnologías existentes. Para el caso de generación distribuida, la unidad sería más pequeña (entorno a 10kW) siendo alimentada por el gas natural de la red doméstica.

Características de estas micro-turbinas:

- El grupo generador que proporciona la potencia, excluyendo el sistema de control y el tanque de combustible, pesa solo 48 kg en comparación con los 433 kg de un generador diésel actual.
- Las dimensiones aproximadas son de unos 600 mm de largo y 250 mm de ancho.

Aplicaciones

En aplicaciones que requieren una generación de energía compacta y liviana con una flexibilidad significativa en el combustible utilizable, las micro-turbinas ofrecen una solución versátil. Para energía fija o desplegable, sistemas no tripulados grandes y como extensores de rango en vehículos eléctricos, las micro-turbinas de EcoJet ofrecen una capacidad de producción fiable en el rango de 5kW a 20kW. EcoJet, mediante el empleo de materiales avanzados, flexibilidad en la selección de combustible y un diseño eficiente y modular, ofrece una alternativa con capacidad escalable, ligera y compacta.

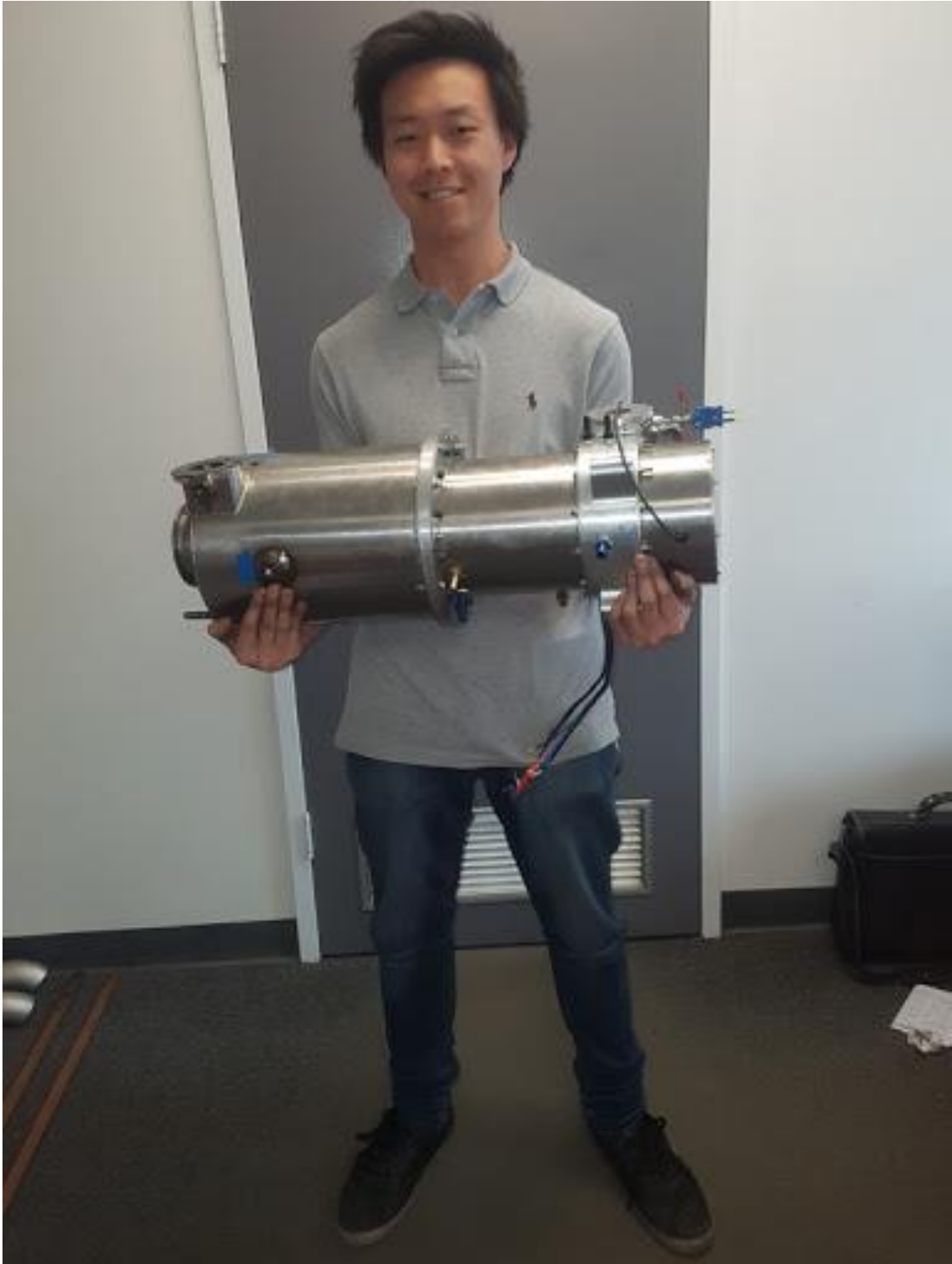


Figura 17: James Kim con una micro-turbina de su creación

4. Micro-turbina para extensión de rango en vehículos eléctricos

4.1. Comparación de diferentes combustibles

Tal y como nos dice la AOP [19], desde hace tiempo, los vehículos han sufrido cambios tecnológicos tanto en el motor como en los combustibles. Las demandas continuas de innovación han supuesto retos tecnológicos consiguiendo unas soluciones que podemos considerar aceptables con respecto a lo económico.

Las normativas europeas, para mantener una calidad del aire aceptable, han forzado la evolución de los motores y los combustibles, como puede ser la inclusión de los catalizadores, obligando a la producción de combustibles sin azufres. Los motores de hoy en día, son capaces de emitir muchas menos partículas contaminantes que los primeros motores, siendo treinta veces menos contaminantes en los motores diésel y diez veces menos en los motores de gasolina. Actualmente, el desafío más importante para la industria es mejorar la eficiencia energética, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En la UE las emisiones de GEI se deben al transporte en un 21%, siendo el mayor causante de esto, en un 94%, el transporte terrestre. Dentro de este porcentaje, la distribución por tipo de vehículos es la siguiente: 60% automóviles, 25% vehículos pesados y 15% vehículos industriales ligeros. Para el periodo 2020-2030, los objetivos ambientales de la UE son muy exigentes con respecto a la reducción de estas emisiones, por parte de los vehículos, de GEI.

4.1.1. Evolución de los motores y tendencias.

Para cumplir los objetivos medio ambientales será necesario integrar mejoras de eficiencia en los motores que se encuentran en comercialización, y, llegando a ser necesario en ciertos casos, el funcionamiento conjunto de un motor tradicional con algunos tipos de propulsión eléctricas. Además de lo anterior, hay que tener en cuenta el sobrecoste de cada tecnología:

- Los vehículos de reducidas dimensiones tienden a funcionar con motores realmente eficientes de gasolina.

- Los vehículos medianos funcionan tanto con motores diésel como de gasolina, y todavía tienen mucho potencial para mejorar y llegar a cumplir los objetivos para lograr reducir las emisiones de CO₂.
- Para vehículos de grandes dimensiones, el motor diésel se impondrá junto con la hibridación eléctrica.
- Los vehículos pesados tienen una gran oportunidad para conseguir hibridarse con una propulsión eléctrica, llegando a predominar sobre la opción de seguir utilizando motores diésel, para así lograr los objetivos de emisiones.

4.1.2. Carburantes convencionales (gasóleo y gasolina)

Las noticias que nos facilitan los diferentes fabricantes de motores, nos dan a estimar que, en el futuro inmediato, es decir, de 2020 en adelante, los motores de gasolina conseguirán emitir un tercio menos de CO₂ y llegarán a consumir también un tercio menos de energía que los de la anterior década. Si a un motor de gasolina mejorado le incorporamos tecnología eléctrica para hacerlo híbrido, conseguiríamos mejorar las emisiones y el consumo de combustible en un 34% extra, es decir, se obtiene una mejora aproximadamente del 65% con respecto a emisiones de GEI, comparado con un vehículo de gasolina de la década anterior. En los motores con tecnología diésel, estos ajustes tendrían un menor efectos, siendo del 25% debido a la tecnología que compone este tipo de motores, y un 25% más si lleva integrado un sistema de hibridación eléctrica, siendo, en conjunto, un logro del 50% de reducción en la emisión de GEI y consumo de combustible, comparado con un motor diésel de la década anterior.

4.1.3. Usos de biocombustibles en altos porcentajes

Desde hace varios años, los biocombustibles son cada vez más usados para el transporte por carretera. Representan aproximadamente el 6% de las gasolinas y el 4.3% del gasóleo en peso [19]. Actualmente se utilizan 3 tipos de biocombustibles, usándose mezclados con los combustibles convencionales. Existen limitaciones técnicas para la utilización de los biocombustibles en los motores actuales con cualquier mezcla. Para el etanol existen problemas para vehículos antiguos (antes del 2000), ya que usan materiales en las juntas, como gomas y

elastómeros, que se ven perjudicados y pierden sus propiedades cuando el contenido de la gasolina es superior a un 5% de etanol (E5).

Actualmente, los vehículos utilizan materiales que toleran un máximo del 10% de etanol (E10), no descartándose un posible aumento de la mezcla de alcohol en gasolina, hasta 20 o 25% (E20 y E25 respectivamente). Esto provoca una reducción de CO₂ entre el 4 y el 8% para el E10 y el E20 respectivamente. Cabe observar que no se producen reducciones como en el caso de un vehículo híbrido.

FAME: Es un biocarburante que puede provocar problemas, ya que ensucia los inyectores y obstruye los filtros, por lo tanto, el uso de este biocarburante está limitado a una mezcla con gasóleo de no más del 7% (B7). Los fabricantes de automóviles se niegan a que se aumente este límite, debido a las complejas condiciones de trabajo de los motores diésel modernos (presión y temperatura) para poder llegar a los niveles de contaminación medioambientales fijados. Este biocombustible produce unas reducciones de emisiones de CO₂ de en torno un 3.5%, muy lejos de las reducciones de los vehículos híbridos.

Aceite vegetal hidrotratado (HVO): Este biocombustible no tiene limitaciones de utilización en vehículos con un motor de gasoil. La sustitución del gasóleo por el HVO permite reducciones de CO₂ muy significativas dependiendo del proceso de producción y la materia prima utilizada, pudiendo ser incluso superiores al vehículo híbrido en algún caso.

4.1.4. Gas natural

El gas natural puede ser una buena alternativa para reducir las emisiones, sin embargo, el gas natural comprimido, puede ser hasta un 20% menos eficiente que la gasolina. Para emisiones GEI, comparando con el resto de tecnologías, el gas natural presenta unas emisiones de CO₂ menores si lo comparamos con los motores de gasolina (menor que 30%) y superiores al motor de gasóleo (15%).

Aunque el uso de gas natural sea menos contaminante, al tener los motores de gas natural una peor eficiencia, las emisiones por kilómetro recorrido de CO₂ pueden ser equivalentes a las de un motor diésel. Como el gas natural tiene una menor densidad energética, estos motores necesitan consumir más energía por distancia recorrida en comparación con los vehículos diésel, por lo tanto, teniendo la misma cantidad de ambos combustibles, se consumirá antes el gas natural, haciendo que la autonomía sea limitada cuando se propulse el vehículo al 100% con gas natural. Hoy en día los fabricantes que sacan al mercado vehículos propulsados mediante GNC, no son

vehículos puramente propulsados por este combustible, sino que utilizan tecnología bifuel, en los que coexisten un depósito de GNC y otro depósito de gasolina, aumentando así la autonomía.

Gas natural sintético

Audi, marca alemana de automóviles, ha sido la primera en desarrollar un proceso para la obtención de gas natural sintético (*Figura 18*). Utiliza el CO_2 de la atmósfera, transformándolo mediante las plantas que producen gas sintético y biogás en combustible. Para llevarlo a cabo, se utiliza energía eléctrica de origen renovable (hidráulica, eólica y fotovoltaica), descomponiendo el agua en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno reacciona con el CO_2 mediante el proceso de metanización, liberando el oxígeno sobrante a la atmósfera [20].

El gas combustible producido se almacena y se reposta de la misma manera que el gas natural de origen fósil, pudiéndose utilizar en un motor de combustión o turbina. Se emplea CO_2 que procede de una planta de producción de biometano obtenido por descomposición de compuestos orgánicos. Por lo tanto, la producción de este gas es respetuosa con el medio ambiente. Este gas natural, tiene una reducción del 80% de emisiones de CO_2 con respecto a la gasolina.

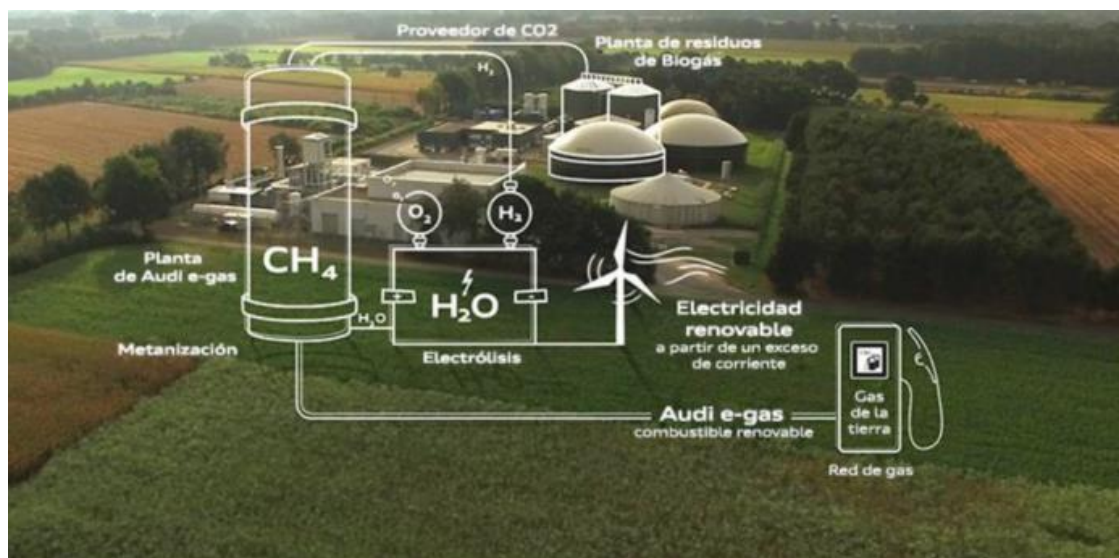


Figura 18: Esquema planta Audi e-gas

El gas se produce en un proceso de dos etapas: electrólisis y metanización. La primera etapa, se utiliza electricidad de origen renovable para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. En la segunda

etapa, el hidrógeno reacciona con CO_2 , obteniéndose metano sintético. El proceso químico-catalítico se desarrolla a alta presión y alta temperatura.

4.1.5. GLP

El GLP o Gas Licuado del Petróleo, es otra opción de combustible, la cual, para los futuros motores más tecnológicos, puede conseguir consumos inferiores a los motores que utilizan gasolina (10% inferiores), sin embargo, superiores a los motores diésel (11% superior). Con respecto a la emisión de CO_2 , nos encontramos con emisiones similares a los motores diésel y un 17% menores que los motores de gasolina. En comparación del GLP con el gas natural, el GLP es una opción más eficiente energéticamente y presentando emisiones de CO_2 muy parecidas.

4.1.6. Vehículos eléctricos

En primer lugar, vamos a proceder a comparar las distintas alternativas de energía para el transporte con los diferentes vehículos eléctricos:

Híbrido: Vehículo híbrido de gasolina o gasoil.

PHEV: Plug-in hybrid electric vehicle.

REEV: Range extender electric vehicle.

BEV: Battery electric vehicle.

FCEV: Fuel cell electric vehicle.

Podemos observar hasta ahora que, con los anteriores combustibles mencionados, la opción de hibridar los vehículos es siempre una mejor opción, ya que reducimos las emisiones de CO_2 y conseguimos consumir menos energía. Para el caso de vehículos enchufables, hay que tener en cuenta el origen de la electricidad y a en qué momento recargamos la batería del vehículo, ya que son datos importantes para ubicar el estado de la tecnología eléctrica con respecto al resto de combustibles.

4.1.7. Hidrógeno

Asociamos a vehículos no contaminantes y eficientes a aquellos que utilizan hidrógeno como combustible. Pero en realidad, esta tecnología ha resultado ser más difícil de lo esperado de desarrollar, y lograr avanzar en la tecnología de utilización del hidrógeno como combustible para propulsar los vehículos no está dando tantos éxitos como se preveía. El hidrógeno, al ser el gas más ligero entre todos los gases, tiene una densidad energética baja. A causa de este motivo, se debe almacenar comprimido a presiones muy altas (700 bar) o licuado a temperaturas muy bajas. Gracias a este procedimiento tecnológico, podemos recargar una gran cantidad de hidrógeno en el vehículo. A diferencia de otros combustibles, el hidrógeno es un vector energético y no una fuente primaria de energía. Aunque abunda en la naturaleza el hidrógeno no se da en estado libre por lo que necesitamos obtenerlo de compuestos químicos como el agua, utilizando un consumo energético para producir la electrólisis. Este proceso provoca más o menos emisiones GEI dependiendo del origen de la energía y la vía de obtención seleccionada. Para obtener el hidrógeno hay sistemas más o menos ecológicos. En la electrólisis, se transforma el agua, separándola en hidrógeno y oxígeno, mediante un gran consumo eléctrico. La producción de hidrógeno mediante la utilización de electricidad producida mediante energía renovable es la mejor elección, ya que es con la que obtenemos menores emisiones de GEI.

Como nos dice Pilar Orihuela en su artículo [21], los impedimentos para que el hidrógeno se consolide como combustible para los vehículos de transporte serían los siguientes:

- La falta de una infraestructura sólida de producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno es uno de los grandes impedimentos para el desarrollo del hidrógeno. Al no existir en la naturaleza, y tener que fabricarlo, supone por sí un inconveniente. No obstante, existen varios métodos para producir hidrógeno a un coste razonable y con control de emisiones. El hidrógeno producido por electrólisis ocasiona poco impacto ambiental siempre y cuando la electricidad empleada sea de origen renovable, lo que generaría bajas emisiones GEI. Otro proceso muy limpio es la descomposición termoquímica del agua, que consiste en aprovechar las elevadas temperaturas de los reactores nucleares o de los concentradores solares para producir hidrógeno de la descomposición del agua. Otro de los obstáculos que dificultan el uso del hidrógeno en motores es su transporte y distribución. El hidrógeno tiene menos energía por unidad de volumen, por lo que sus costes de distribución son más altos que los de la gasolina y los del gasóleo. En general, el hidrógeno se suele producir próximo a los puntos de consumo en plantas industriales, realizándose la distribución por transporte terrestre o tuberías. Construir una red general de tuberías para el hidrógeno supone un gran desembolso, por lo tanto, una solución sería producir el hidrógeno de forma regional o instalando la

infraestructura donde se concentre mucho la demanda. Otra opción sería aprovechar la infraestructura de distribución del gas natural, inyectado hidrógeno en los gasoductos y separándolos en el punto de destino.

- El primer problema que surge al emplear hidrógeno en un motor de combustión es la disminución de potencia, del orden del 15%, debido a la baja densidad y al contenido energético por unidad de volumen. Para evitar b esto, la solución podría ser inyectar hidrógeno comprimido o líquido. Otro inconveniente es su baja energía de ignición, que hace que este sea propenso a autoencenderse con un punto caliente. Además, el hidrógeno tiene una distancia de apagado muy pequeña, lo que obliga a usar recubrimientos térmicos superficiales. Esta pequeña distancia de apagado junto con la baja energía de ignición, favorece el retroceso de llama, por lo que el control de la misma es un aspecto importante en la combustión del hidrógeno. En las turbinas de gas, un parámetro importante en la combustión del hidrógeno es la temperatura máxima de llama, que afecta de forma directa a la generación de NOx, debido a que la formación aumenta exponencialmente con la temperatura a partir de 1500°C, pudiéndose dañar los materiales de la turbina por los altos niveles térmicos. El amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno facilita el control de la temperatura, ya que permite usar mezclas aire-combustible muy pobres para diluir la mezcla y reducir la temperatura.
- En la actualidad, es fácilmente adaptable motores de gasolina a su uso con hidrógeno alcanzando eficiencias razonables (*Figura 19*). Las turbinas de gas necesitan ampliar su desarrollo, aunque en el mercado existen fabricantes que han adaptado algunos modelos comerciales a este tipo de combustible, obteniendo motores de suficiente fiabilidad y robustez.

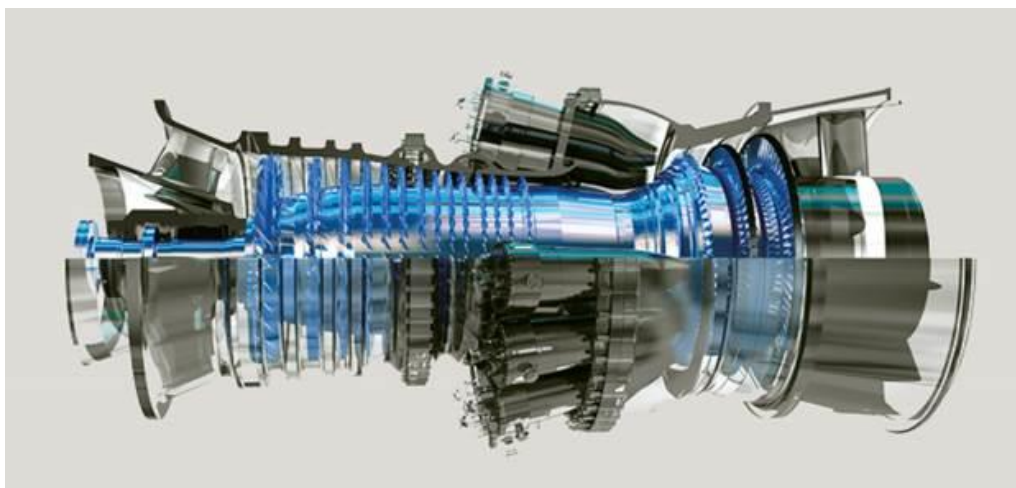


Figura 19: Turbina de gas 7FA de General Electric. Combustible hidrógeno

- Para favorecer la incorporación del hidrógeno como combustible es necesaria la aceptación social del mismo, informando de los estrictos controles de seguridad disponibles para la aplicación de esta tecnología, y, por otra parte, hay que promover y mostrar las importantes ventajas desde el punto de vista medioambiental que tiene su uso

4.1.8. Emisión de gases regulados

Los motores de combustión interna transforman la energía química que encontramos en el combustible en energía mecánica para propulsar los vehículos. Los combustibles fósiles son compuestos de hidrocarburos, los cuales mientras se produce una combustión ideal solo darían lugar a CO_2 y H_2O . las concentraciones típicas en volumen de estos gases de escape suelen estar comprendidas entre CO_2 (2 – 12%), H_2O (2 – 12%), O_2 (3 – 17%) y N_2 (balance estequiométrico).

En un motor, durante la combustión, también encontramos emisiones de otros contaminantes en cantidades menores debido a procesos no ideales, como inquemados del carburante, posibles reacciones que se produzcan entre los diversos componentes de la mezcla a alta temperatura y presión, posibles y diversos aditivos que componen los aceites lubricantes, así como otros componentes del combustible. Los contaminantes más comunes son:

- Inquemados de hidrocarburos (HC)
- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Partículas (PM)

Estos contaminantes, en los gases de escape, tiene una concentración minoritaria, y debido al gran avance en las tecnologías de post-tratamiento de los gases de escape, las emisiones totales en los vehículos actuales pueden considerarse “cero”.

4.1.9. Costes de la energía por tipo de tecnología

A continuación, se realizará un pequeño análisis sobre los diferentes costes que tendría para una persona recorrer 100 kilómetros utilizando vehículos equivalentes propulsados con las diferentes tecnologías vistas anteriormente (*Figura 20*).

Para llevar a cabo este análisis, se ha elegido como referencia para el precio de cada uno de los combustibles la media de los precios mensuales.

En el vehículo eléctrico, el coste de la recarga es diferente entre usuarios al estar relacionado con la tarifa aplicada de luz, el momento del día en los que se realizaría la recarga, si la carga es normal o una supercarga, o si realizamos esta recarga en el domicilio o en puntos de recarga públicos. Para la realización de este análisis, hemos elegido un modelo de vehículo estándar, con similares prestaciones, pero propulsados por tecnologías diferentes [19]:

Modelo	Tipo combustible	Consumo l/100 km	Consumo kg/100 km	Consumo kWh/100 km
Ford Focus	GNC		4,1	
Focus 1.5 TDCi 120 CV	Gas-oil	4,1		
Focus C-Max Autogas 117 CV	GLP	6,8		
Focus 1.0 Ecoboost 125 CV	Gasolina	5,1		
Ford Focus Electric 125 CV	Electricidad			17,5

Tabla 4: Comparación de consumo de diferentes tecnologías [19].

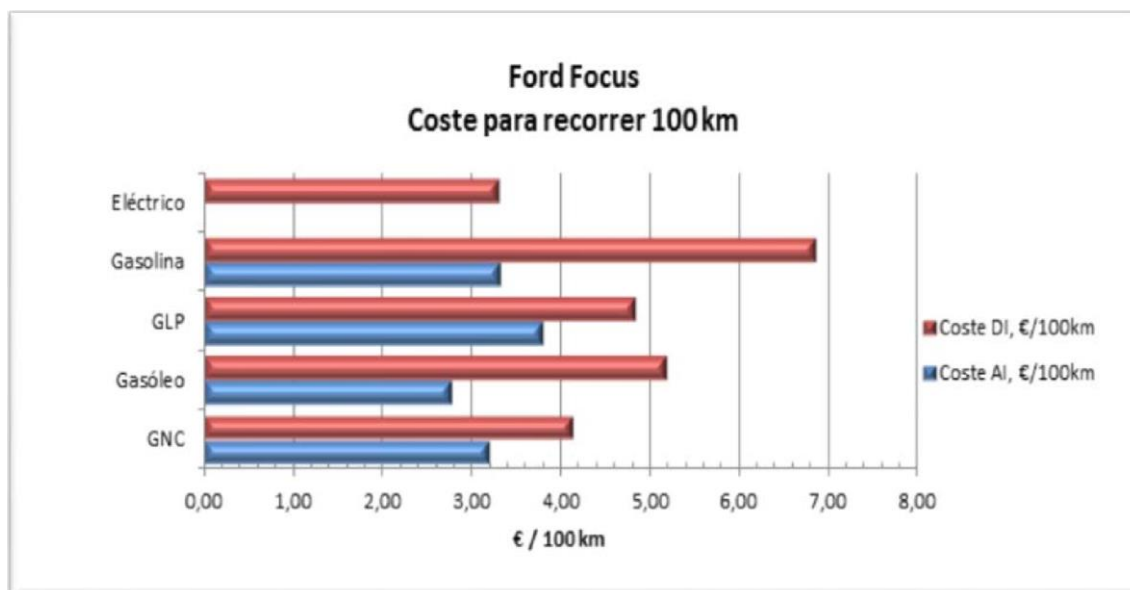


Figura 20: Coste para recorrer 100 km según tecnología. Extraído de [19].

En la figura anterior, podemos ver que el vehículo eléctrico es el que tiene un coste inferior por kilómetro recorrido. Entre el resto de carburantes, el GNC es la opción más económica y la gasolina resulta ser la opción más costosa para el usuario cuando se tienen en cuenta los impuestos. Hay que tener presente los diferentes impuestos que aplican a cada combustible. Pero quizás, cambiar las políticas para los diferentes incentivos, y facilitar el acceso a las personas a cambiar a estas alternativas cambiaría el entorno. Sin considerar los impuestos, el gasóleo es la opción más económica, siendo la gasolina y el GNC muy similares económicamente hablando.

Cada tecnología tiene un coste muy distinto, siendo una característica a considerar a la hora de valorar los diferentes costes que pueden suponer. Para la comparación, se han tomado los precios de adquisición de cada modelo, restando las ayudas para la adquisición de vehículos ecológicos, siendo el modelo de gasolina la opción más barata:

Modelo	Combustible	PVP, €
Ford Focus	GNC	24.500
Focus 1.5 TDCi 120 CV	Gas-oil	23.050
Focus C-max autogas 117 CV	GLP	22.250
Focus 1.0 Ecoboost 125 CV	Gasolina	21.250
Ford Focus electric 125 CV	Electricidad	33.500

Tabla 5: Coste adquisición según tecnología [19].

Por lo tanto, el vehículo más barato de adquisición es el de gasolina, pero presenta una energía más cara. Por lo tanto, el dato más relevante sería el cálculo de los kilómetros que son necesarios recorrer con cada vehículo para que el coste conjunto de vehículo - combustible sea equivalente a la opción más barata, es decir, el vehículo propulsado mediante un motor de gasolina.

La autonomía que cada tipo de tecnología puede ofrecer sería una característica importante a considerar por parte de los usuarios a la hora de elegir un tipo u otro de tecnología. La autonomía junto con las infraestructuras necesarias para el repostaje limita las opciones del consumidor, y por tanto el tipo de vehículo, siendo un factor muy a considerar.

Para finalizar, el vehículo eléctrico es el tipo de tecnología que menos emisiones de CO₂ presenta y el que menor coste de adquisición de la energía supone para un usuario actualmente. Sin embargo, el coste de adquisición de este tipo de tecnología es superior al del resto de tecnologías.

4.2. Integración con el vehículo

La integración de la micro-turbina de gas como extensor de rango es muy favorable debido a sus reducidas dimensiones y peso, ya que es un sistema simple y con pocos componentes (*Figura 23*), teniendo así un bajo mantenimiento (*Figura 22*). El sistema que compone el correcto funcionamiento, como veremos más adelante, es un sistema elemental, traducándose así a una seria opción si los fabricantes decidieran apostar por esta tecnología con una gran producción en serie, de forma que resultaría una solución más económica y fácil de integrar al vehículo eléctrico para conseguir aumentar su autonomía.

Una cuestión a considerar, es por qué no se utiliza un motor de combustión interna alternativo como extensor de rango, ya que sus rendimientos eléctricos son de en torno un 34% frente a un 29% de la micro-turbina de gas. Esto se debe a que las micro-turbinas de gas gracias a una serie de mejoras, pueden llegar a conseguir rendimientos eléctricos de un 38%, siendo más alto que el de los motores de combustión interna alternativos [22]. Otro motivo para escoger una micro-turbina de gas, es el hecho de que puede utilizar casi cualquier combustible que se pueda quemar, con unas emisiones medioambientales muy reducidas, siendo con algunos combustibles nulas, que es en lo que consiste en esencia el coche eléctrico, una alternativa de transporte sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

4.2.1. Descripción del sistema

Los elementos principales que constituyen nuestro sistema de propulsión eléctrica con extensor de rango mediante micro-turbina son los siguientes (*Figura 21*):

Micro-turbina de gas

La micro-turbina está diseñada para ser instalada en el interior del vehículo, cubierta, ocupando un mínimo espacio, y protegido térmicamente. Sus componentes están diseñados para funcionar con temperaturas exteriores que oscilan entre los -20°C y los 50°C [23]. Se encarga de accionar el alternador, utilizando como combustible gas natural o cualquier tipo de combustible líquido o gaseoso de origen fósil o renovable. Este motor funcionaría según un mínimo de porcentaje de carga previamente seleccionada, oscilando entre un mínimo de un 10% y un máximo del 60%, evitando así una degradación prematura de la batería y prolongando su vida útil. Funcionaría mediante un ciclo Brayton con regeneración, maximizando el rendimiento y optimizando el consumo específico, ya que el punto de funcionamiento de la misma permite operarla de forma estable según la carga óptima de generación eléctrica requerida en cada momento.

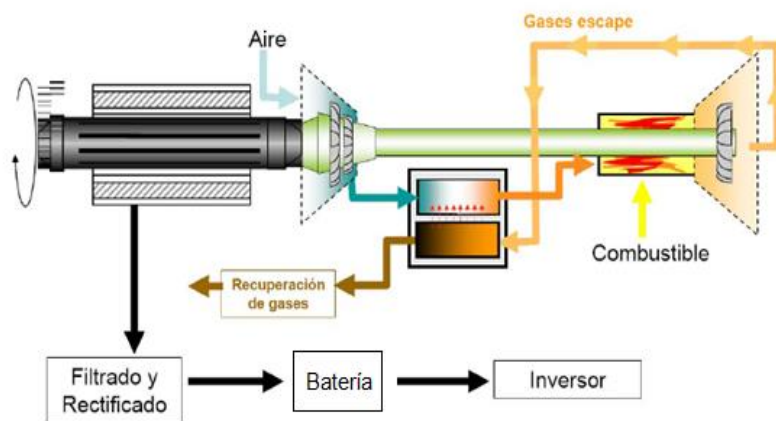


Figura 21: Esquema micro-turbina [5].

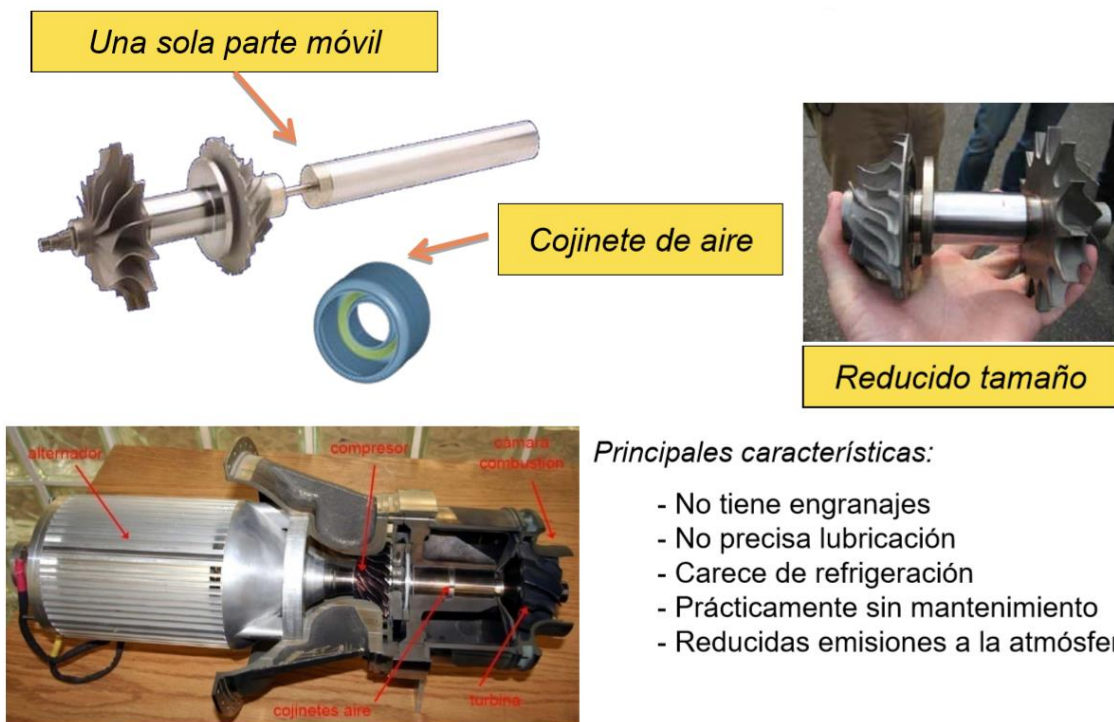


Figura 22: Partes micro-turbina [5].

Recuperador

El recuperador es un dispositivo que calienta el aire de admisión a la cámara de combustión, utilizando las altas temperaturas de los gases de escape de la micro-turbina. Gracias a este componente, se alcanza un aumento de la eficiencia global de alrededor de un 50% respecto a los diseños sin recuperador. Una micro-turbina de un ciclo simple mantiene una eficiencia eléctrica de solo el 14%, con una recuperación de calor si logra una eficiencia eléctrica del 25%. Con la recuperación, la temperatura de los gases de escape si cae a 250°C. Los gases de escape atraviesan el intercambiador de calor con un flujo laminar y uniforme, maximizando el rendimiento y reduciendo las pérdidas.

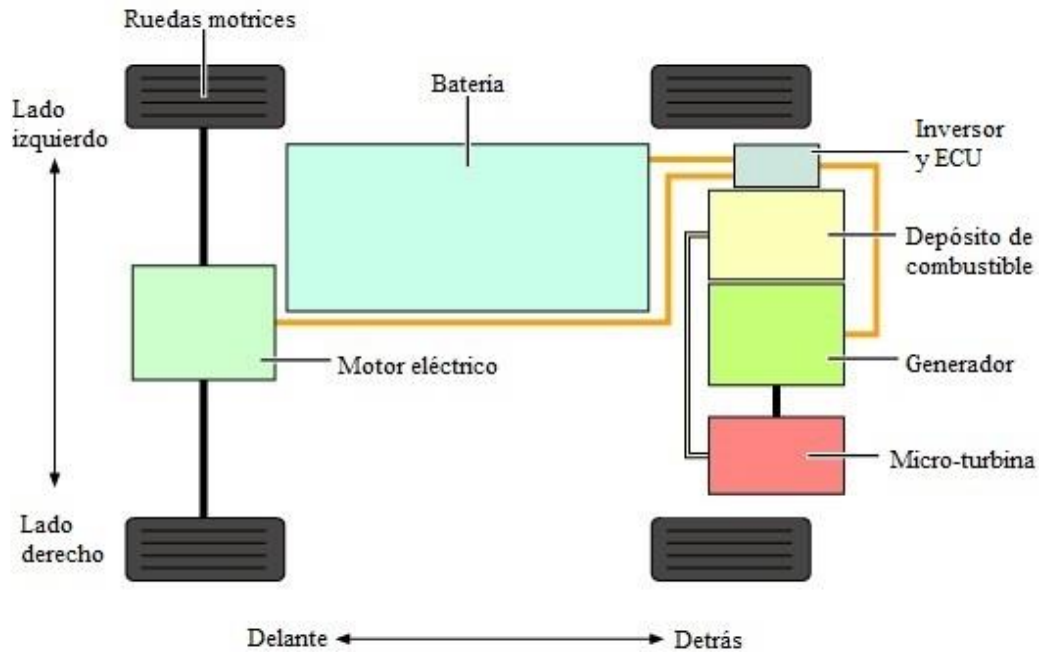


Figura 23: Esquema integración del sistema

Generador

La micro-turbina produce electricidad a través de un generador de alta velocidad (96,000 rpm) al girar el eje del turbocompresor. El diseño del generador de alta velocidad de un solo eje emplea un alternador de imanes permanentes y requiere que la alta frecuencia de salida de CA (más de 1600 Hz) se convierta en CC, disponiendo de una salida a 50 Hz para uso general. Estas condiciones de energía implican la necesidad de rectificar, a través del equipo electrónico, la alta frecuencia de CA a CC, por lo tanto, invertir la CC a CA, dejándola ubicada en valores estabilizados según las necesidades del motor. Debido a la alta velocidad de rotación del generador, se requiere un diámetro de rotor pequeño y una longitud de rotor larga en relación con el diámetro para resistir las fuertes fuerzas centrífugas generadas a velocidades tan altas. Las dimensiones aproximadas del generador son las siguientes: diámetro externo del estator: 180 mm; Diámetro interno del estator: 90 mm y diámetro del rotor: 30 mm. Además, el uso de imanes permanentes evita tener que hacer una conexión eléctrica para crear un electroimán, lo que no sería fácil debido a las altas velocidades de rotación. El turboalternador se enfría a través del aire que ingresa a la turbina antes de que ingrese al compresor. De lo contrario, las altas temperaturas degradarían el rendimiento de los imanes permanentes.

Baterías

Un vehículo eléctrico, como su nombre indica, utiliza electricidad, y el componente de donde la obtiene es la batería, siendo por tanto uno de los componentes más importantes. La autonomía y el coste del coche dependen en gran medida del tipo y dimensiones de la misma. Acumula la energía mediante elementos electroquímicos, con un rendimiento muy elevado. El ciclo de vida de las baterías está definido por la cantidad de procesos de carga y descarga que esta es capaz de soportar. La energía es aprovechada por las reacciones de oxidación-reducción, generando energía eléctrica.

El paquete de baterías utilizadas para proporcionar energía al motor eléctrico será del tipo Ión-Litio de 380 V, con una capacidad de 40 kWh, dándonos una autonomía de unos 250 kilómetros aproximadamente, con un consumo previsto de 16 kWh a los 100 kilómetros. El emplazamiento del conjunto de baterías se encontrará bajo el suelo del coche, a lo largo de este, mejorando así el centro de gravedad del vehículo y, por lo tanto, su estabilidad.

Motor eléctrico

El vehículo posee un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes, incrustados en su rotor, por lo tanto, no necesita excitación externa ni escobillas para generar el campo magnético en el rotor. De esta manera el rotor se hace girar cuando se le aplica este campo magnético que se ha generado en el estator, haciendo su diseño más compacto y sencillo. La principal característica de los imanes permanentes es que retienen sus líneas de flujo, a lo largo del tiempo, una vez se han magnetizado.

Gracias a su mayor eficiencia, permite que la batería pueda ser de un tamaño más reducido, conservando su autonomía.

Características técnicas aproximadas del motor eléctrico:

- Potencia máxima de 170 CV (130 kW).
- Par motor máximo de 250 Nm y está disponible desde 0 rpm.
- El motor eléctrico síncrono pesa 50 kg
- Número de revoluciones máximas de 11400 rpm.
- Tracción delantera.

Depósito de combustible

El depósito de combustible estaría fabricado en acero al carbono de alta resistencia con un tratamiento anticorrosión mediante galvanizado en caliente, e iría situado en la parte trasera del coche, exactamente debajo del maletero. Suponiendo que este vehículo utilizaría gas natural comprimido, aunque podría también utilizar una amplia variedad de combustibles. En el caso de GNC, la capacidad del mismo estaría sobre los 20 kg a una presión de 200 bares, aunque también podría almacenar hidrógeno en su variante de 350 bares, ya que el depósito estaría diseñado para soportar hasta 400 bares [24]. La presión es adaptable y se controla electrónicamente mediante unas electroválvulas que mantienen el gas estanco y que solo funcionarían al poner el contacto. Aunque el gas natural está almacenado a la presión anteriormente mencionada, se inyectaría a la micro-turbina a presiones aproximadas entre 5 y 9 bares. Un regulador de presión de dos etapas en la entrada de la cámara de combustión, reduciría la presión y aseguraría una óptima combustión del gas. La ECU controlaría este regulador mediante electrónica en todo momento.

4.2.2. Características de baterías para vehículos eléctricos

Las características más importantes de las baterías de coches eléctricos son las siguientes:

- **Potencia**

Es la capacidad de suministrar potencia al vehículo en la descarga de la batería. Se mide en W/kg. Una batería con mayor potencia proporcionará unas mayores prestaciones.

- **Grado de eficiencia**

La eficiencia, medida en tanto por ciento, es la energía que la batería realmente aprovecha.

- **Densidad energética**

Se da en Wh/kg. Es la energía que una batería puede acumular por unidad de peso. A mayor densidad energética, más energía almacena y proporciona la batería por cada kg. Es una de las claves en la autonomía del vehículo y actualmente es la característica a mejorar.

- **Ciclos de carga y descarga**

Si queremos una mayor durabilidad en la vida útil de la batería, necesitaremos disponer de un amplio número de ciclos de carga y descarga.

- **Capacidad de la batería**

La medimos en kWh. La capacidad de la batería es un indicativo de la autonomía del vehículo y del precio de la misma.

- **Coste**

El coste de las baterías es uno de los factores más determinantes en el precio del vehículo eléctrico.

4.2.3. Tipos de baterías

Es evidente que uno de los componentes más importantes de un vehículo eléctrico es la batería. Un vehículo eléctrico es capaz de funcionar mediante la electricidad acumulada en baterías recargables, que permite su funcionamiento sin emisiones y de una forma silenciosa. En los últimos años se ha producido una sustancial mejora de las baterías con un menor coste, reduciendo su tamaño, aumentando el número de ciclos de carga, su capacidad, eliminándose el efecto memoria y aumentando su durabilidad.

Como ya se dijo anteriormente, uno de los grandes inconvenientes de los vehículos eléctricos, a la hora de sustituir a los vehículos tradicionales, es la capacidad de energía eléctrica que las baterías pueden acumular, por lo tanto, su limitada autonomía en comparación con la acumulación de energía del combustible.

Actualmente, las baterías de los vehículos eléctricos se fabrican con litio, como las utilizadas en otros dispositivos electrónicos. Es lógico pensar que electrificar los medios de transporte requerirá de un aumento importante de los recursos que componen las baterías, es decir, la extracción de litio, pero la utilización de los extensores de rango minorará este desabastecimiento de litio al utilizar baterías de una menor dimensión.

Las baterías que se pueden emplear en vehículos eléctricos son las siguientes [25]:

Plomo-ácido: Son las baterías de máxima disponibilidad y diseño más antiguo. Este tipo de batería fue inventada por Gastón Planté en 1859. Tiene baja densidad energética, con lo cual haría falta demasiadas baterías para obtener buena autonomía. El tiempo de recarga es muy elevado, oscilando entre las 8 y 10 horas.	
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje elevado ($E=2.1\text{ V}$) • Pueden aportar grandes intensidades de corriente. • Tecnología fácil de integrar. • Batería recargable con un bajo coste. Es la más barata.

	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede reciclar en más de un 90%. • Tecnología muy estudiada.
Desventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Baja energía específica (10-35 Wh/kg). • Moderado número de ciclos de vida para profundidades de descarga elevadas (400-800 ciclos). • Grandes dimensiones y peso. • Constituidas por compuestos tóxicos. • Riesgo de explosión por desprendimiento de hidrógeno.
NiCd: Donde el cátodo es el cadmio y el níquel es el ánodo.	
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Alta longevidad, unos 1500 ciclos aproximadamente. • Su diseño admite la carga rápida.
Desventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • El cadmio es un metal pesado muy tóxico, por lo que estas baterías han sido prohibidas por la Unión Europea. • Baja densidad energética (60 Wh/kg). • Se ven afectadas por el efecto memoria. • Por su baja eficiencia de carga a altas temperaturas, deben ser enfriadas antes de recargarse. • Alto coste del Níquel y del Cadmio.
NiMH: Es parecida a la de NiCd pero sustituyendo el Cadmio por MH.	
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la energía específica respecto a las baterías Pb-ácido (unos 70 Wh/kg). • Su diseño admite la carga rápida (1-3 horas). • Bajo impacto ambiental por la eliminación del cadmio y el plomo. • No necesitan mantenimiento.
Desventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadas prestaciones electroquímicas, especialmente a elevadas intensidades de corriente.

	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de los hidruros metálicos durante el ciclaje. • Moderado número de ciclos (300-600). • Precio más alto, llegando a ser más caras que las de Pb-ácido por encima del doble. • Presentan efecto memoria en una baja proporción.
Ión-Litio: Es una de las más conocidas y deben su desarrollo a los dispositivos electrónicos.	
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada tensión ($E=4V$). • Alta densidad energética, unos 140 Wh/kg. • No sufren de efecto memoria. • Más de 1000 ciclos de vida. • Lenta autodescarga. • Alta plasticidad en el diseño, pudiendo fabricarse en distintas formas y tamaños. • Ligeras. • Bajo impacto ambiental por tener menos contaminantes. • Amplio rango de temperaturas de funcionamiento ($-20-60^{\circ}C$).
Desventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo de carga aumenta con el tiempo de vida de la batería. • Los altos niveles de carga y las altas temperaturas que alcanzan provocan una pérdida de capacidad de la batería. • Necesitan ventilación. • Precio alto.
Li-ion polymer: Es una tecnología similar a la de iones de litio.	
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor densidad de energía que las de ión-litio. • Diseño ultraligero. • Menor autodescarga.
Desventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Se produce inestabilidad causada por sobrecarga y por una descarga por debajo de un umbral de voltaje. • Alto coste de fabricación.

Zebra (NaNiCl): Es una de las baterías recargables que más prometen.	
Ventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo precio. • Contiene más energía específica que las baterías de Pb-ácido. • Vida aproximada de 2.000 ciclos y tiene una autonomía de unos 120 km. • En modo de carga normal, completa la carga en 6 horas. • Precisa de 1 hora para alcanzar el 80% de capacidad en modo carga rápida.
Desventajas:	<ul style="list-style-type: none"> • Sus temperaturas de funcionamiento oscilan 260°C a 360°C, necesitando de cierto aislamiento térmico. • En periodos de inactividad se producen pérdidas térmicas. • Dimensiones y capacidad limitadas.
Batería Zinc-Aire: Es una tecnología muy avanzada que es capaz de soportar miles de ciclos de carga y descarga. Poseen una alta densidad energética, suministrando una mayor energía que las baterías de Ion-litio a un menor coste. Este tipo de baterías se está considerando como el más apropiado para los vehículos eléctricos en un futuro.	

En la siguiente tabla podemos observar un desglose de las características de las distintas baterías:

Tipo de baterías recargables	Densidad energética (Wh/kg)	Energía/volumen (Wh/litro)	Potencia/Peso (W/kg)	Número de ciclos	Eficiencia energética-%
Zebra (NaNiCl)	125	300	150	1.000	92,5
Polímero de litio	200	300	300	1.000	90,0
Iones de litio	80-160	170-450	1.800	1.000-3.000	90,0
Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)	70-80	140-300	200-1.000	300-600	70,0
Níquel Cadmio (NiCd)	60	50-150	250	1.500	72,5
Plomo-ácido	10-35	60-75	250	400-800	82,5

Tabla 6: Tipos de baterías y características

Supercondensadores: Es otro tipo de dispositivo para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos. Tienen la capacidad de poder aportar una gran cantidad de energía instantánea durante la aceleración y recuperarla rápidamente tras una frenada regenerativa, proporcionando así una gran rapidez de respuesta a la hora de suministrar o recuperar energía. Un supercondensador combinado con una batería, es capaz de unificar potencia instantánea del supercondensador con la capacidad de almacenamiento de una batería. La implementación de este dispositivo junto con la frenada regenerativa mejoraría el rendimiento del combustible en conducción urbana, dónde suele haber constantes frenadas y aceleraciones. Esta unión, permite ampliar la vida útil de la batería, pudiendo así disminuir el tamaño de la batería. Como única desventaja, esta unión necesita de electrónica de potencia, como un convertidor DC/DC, encareciendo el precio del automóvil.

Batería de BaTiO₃: Este tipo de batería tiene la cualidad de que no utiliza una reacción química para suministrar electricidad. Las características de esta batería son las siguientes:

- Fabricación con menor coste y peso.
- Construcción sencilla.

- En teoría, sin límite de ciclos de carga.
- Fabricación menos agresiva con el medio ambiente.
- Máxima carga de 52 kW/h, multiplicando por 10 las capacidades actuales de las baterías.
- Capacidad de cargarse en pocos minutos.

En la siguiente tabla, podemos observar las distintas tecnologías de baterías junto al fabricante más común, su aplicación y sus características:

Batería	Aplicación	Ah	V	Wh/kg	Resistencia (mΩ)	W/kg	SOC útil
Plomo-ácido							
Panasonic	HEV	25	12	26.3	7.8	389	28%
Panasonic	EV	60	12	34.2	6.9	250	---
NiMH							
Panasonic EV	EV	65	12	68	8.7	240	---
Panasonic EV	HEV	6.5	7.2	46	11.4	1093	40%
Ovonic	EV	85	13	68	10	200	---
Ovonic	HEV	12	12	45	10	1000	30%
Saft	HEV	14	1.2	47	1.1	900	30%
Ión- Litio							
Saft	HEV	12	4	77	7.0	1550	20%
Saft	EV	41	4	140	8.0	476	---
Shin-kobe	EV	90	4	105	0.93	1344	---
Shin-kobe	HEV	4	4	56	3.4	3920	18%

Tabla 7: Tipos de baterías con fabricantes más comunes.

5. Modelado de una micro-turbina de gas

5.1. Modelo termodinámico

Nuestro modelo de estudio está basado en el concepto de turbina de gas con regeneración, según el ciclo de Brayton con regeneración, cuyo esquema es el siguiente (*Figura 24*):

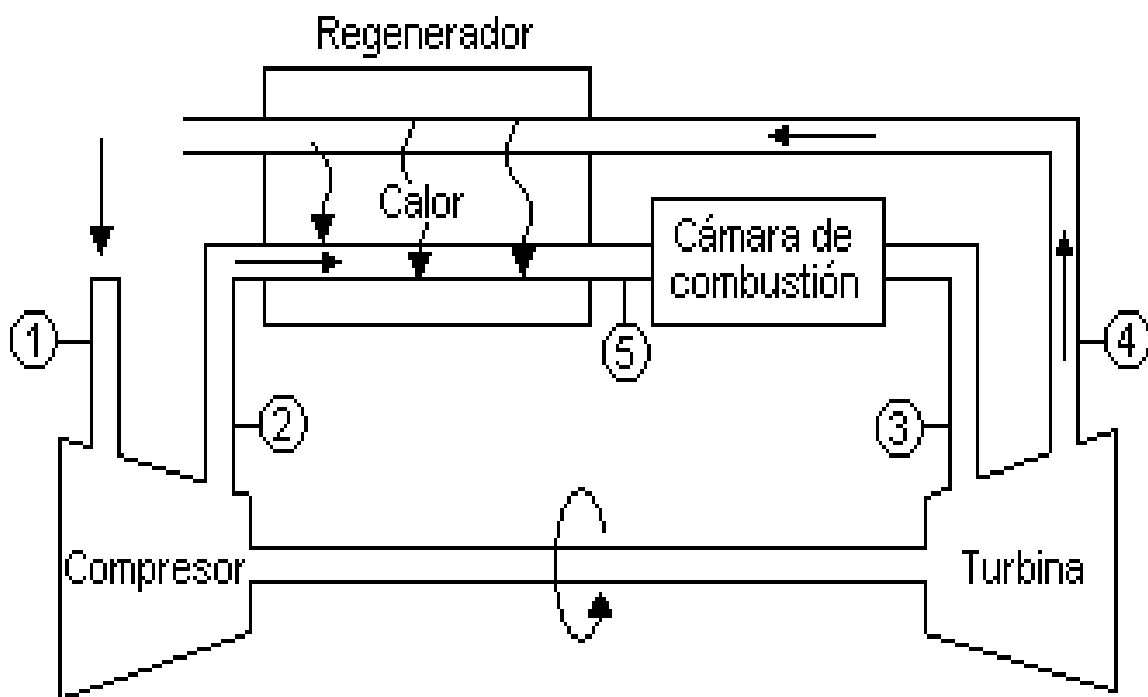


Figura 24: Ciclo Brayton con regeneración

El objetivo principal del ciclo de Brayton con regeneración, es disminuir el consumo específico de calor, es decir, disminuir el calor aportado al ciclo. El requisito para que este sistema pueda funcionar es que la temperatura en el escape de turbina, en el punto 4, sea mayor que la temperatura de salida del compresor, punto 2.

La representación del ciclo termodinámico en un diagrama T-s sería el siguiente (Figura 25):

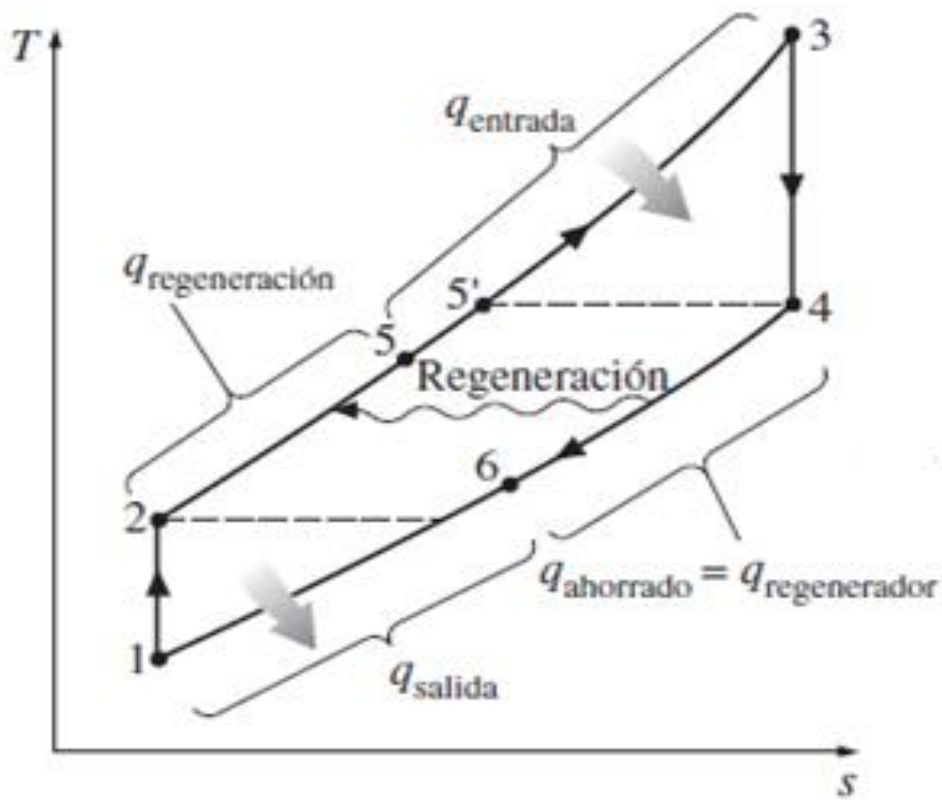


Figura 25: Diagrama T-s ideal ciclo Brayton con regeneración

La expresión del rendimiento térmico para este caso sería:

$$\eta_t = \frac{W_t - W_c}{Q_e} = \frac{W_n}{Q_e} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

W_t : trabajo de turbina

W_c : trabajo del compresor

W_n : trabajo neto

El trabajo neto es el mismo que el obtenido en el ciclo Brayton simple, lo que ocurre en este caso es que el calor aportado al ciclo es menor:

$Q_t = h_3 - h_2 > Q_e = h_3 - h_5$ y por lo tanto el rendimiento es superior.

Para el regenerador, tendríamos que su eficiencia viene dada por la expresión:

$$\epsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad \text{Ec. 12}$$

Un regenerador con una eficiencia más alta ahorrará combustible al precalentar el aire antes de la combustión.

En caso de gas ideal, la expresión del rendimiento viene dado por:

$$\eta_t = \frac{C_p * (T_3 - T_4) - C_p * (T_2 - T_1)}{C_p * (T_3 - T_4)} = 1 - \frac{(T_2 - T_1)}{(T_3 - T_4)} \quad \text{Ec. 13}$$

En el modelo, la temperatura de los gases de escape que salen de la turbina es mayor que la temperatura del aire que abandona el compresor. Por consiguiente, el aire de alta presión que sale del compresor se calienta transfiriéndole calor de los gases de escape calientes en un intercambiador de calor a contracorriente, llamado regenerador o recuperador.

La eficiencia térmica del ciclo Brayton aumenta debido a la regeneración, en virtud de que la porción de energía de los gases de escape que normalmente se libera en los alrededores ahora se usa para precalentar el aire que entra a la cámara de combustión. Esto, a su vez, disminuye los requerimientos de entrada de calor (y, por tanto, de combustible) para la misma salida de trabajo neta. El empleo de un regenerador se recomienda solo cuando la temperatura de escape de la turbina es más alta que la temperatura de salida del compresor.

En nuestro modelo (*Figura 26*) suponemos lo siguientes parámetros:

- Temperatura del aire a la entrada: 20 °C.
- Presión de entrada: 1 bar.
- Caudal de aire entrada: 0,264 kg/s.
- Relación de compresión: 8.
- Rendimiento isoentrópico del compresor: 0,8.
- Rendimiento del regenerador: 1.

- Temperatura entrada a turbina: 960°C.
- Rendimiento isoentrópico de la turbina: 0,8.
- Rendimiento cámara de combustión: 0,99.
- Potencia eléctrica neta generada: 30.65 kWe.
- Combustible: gas natural.
- Compresor tipo centrífugo
- Turbina tipo centrífuga
- Cámara de combustión tubular única
- Montaje en un eje: compresor, turbina y alternador están conectados por un único eje.

Como se dijo anteriormente, las ventajas del montaje en un eje:

- Tiene más inercia, por lo que se reduce el riesgo de embalamiento.
- Se puede emplear el alternador para arrancar el motor

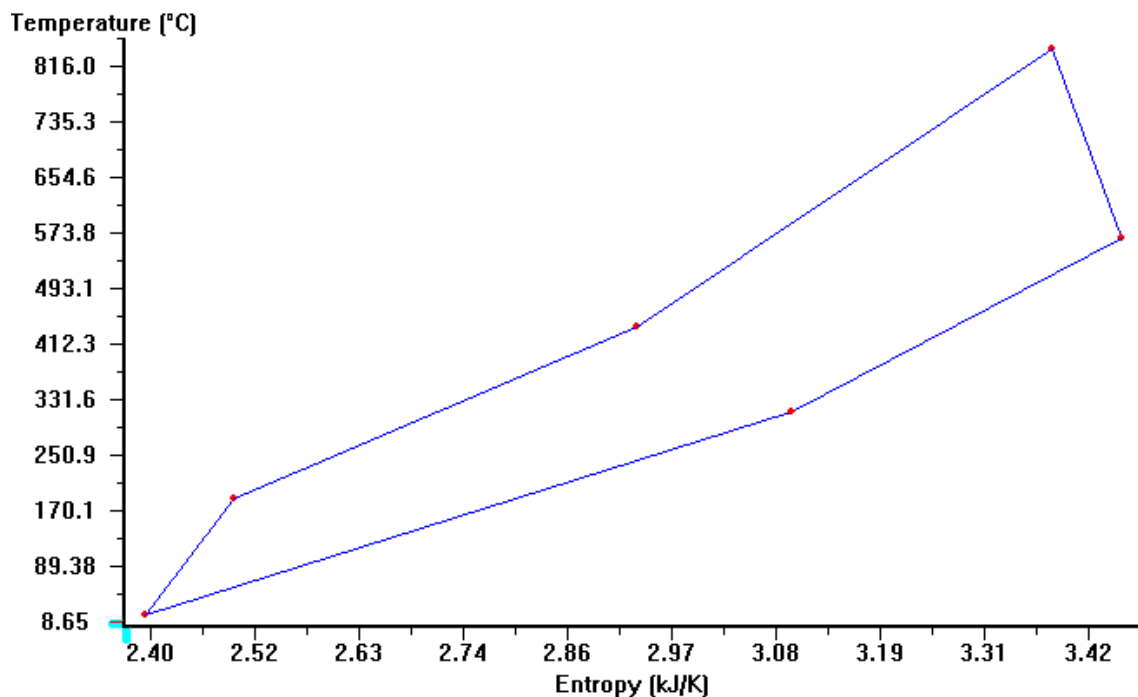


Figura 26: CyclePad diagrama T-s del modelo

5.2. Simulación

Para el estudio de validación del modelo utilizaremos un software llamado CyclePad, creado por Qualitative Reasoning Group. CyclePad es un programa que permite construir y analizar una amplia variedad de ciclos termodinámicos. Actualmente, este software, se está utilizando en la escuela de ingeniería de la Universidad Northwestern, la Academia Naval de los EE.UU., y la Universidad de Oxford.

CyclePad funciona en dos fases, el modo de construcción y el modo de análisis. En la primera fase (construcción), se utiliza un editor gráfico para colocar los componentes y su conexión entre ellos (*Figura 27*) Esta estructura podría tener este aspecto:

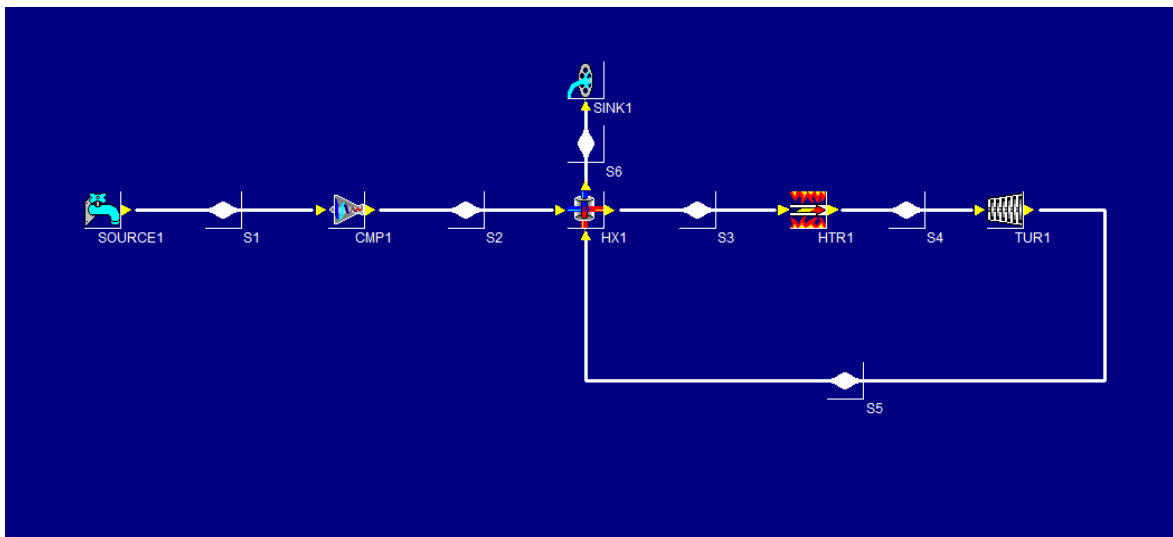


Figura 27: CyclePad modo construcción del modelo

Sólo se puede pasar a la siguiente fase (análisis) cuando CyclePad, ha comprobado que el diseño es correcto y todos los componentes están perfectamente integrados, y cada elemento se ha conectado tanto a la entrada como a la salida para los componentes en el diseño. En la fase de análisis, se especifica el fluido de trabajo que vamos a utilizar, así como los supuestos del modelo que serán sometidos al análisis y los valores numéricos de los componentes e instrumentos. Cuando se especifican valores numéricos, el programa comprueba si se puede entonces calcular otros valores numéricos y muestra los resultados de los cálculos correspondientes (*Figura 28*).

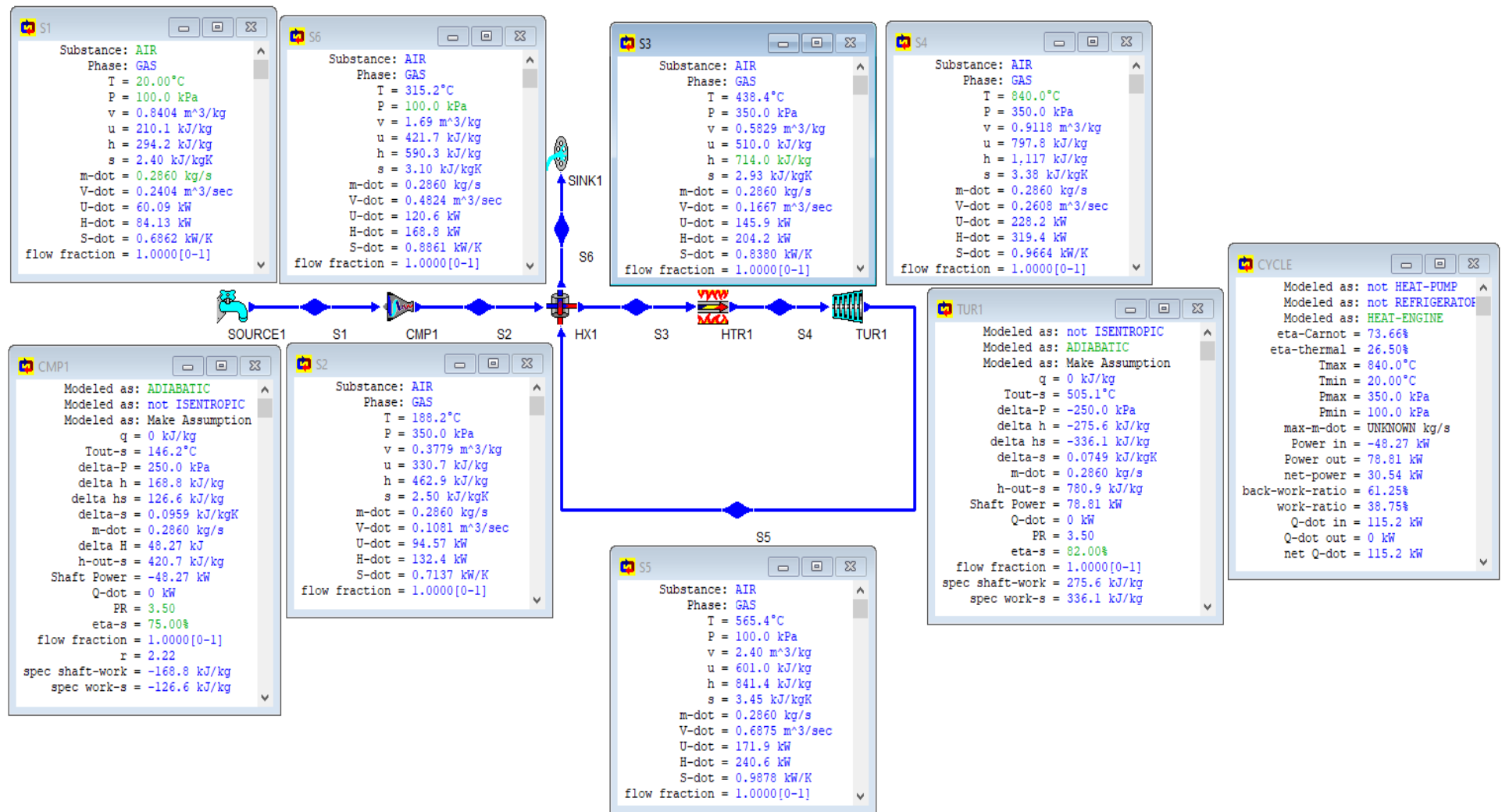


Figura 28: CyclePad modo análisis del modelo

	Modelo			Capstone C30		
Parámetro	°C	kPa	Rendimiento	°C	kPa	Rendimiento
Entrada compresor	20	100	75%	20	100	75%
Salida compresor	188,2	350		-	350	
Salida cámara combustión	840	350	99%	840	350	99%
Salida turbina	496,9	100	82%	-	100	82%
Salida regenerador	315,2	100	66,34%	275	100	83%
Caudal másico	0.286 kg/s			0.313 kg/s		
Rendimiento termoeléctrico ciclo	26,50%			26,10%		
Rendimiento térmico Carnot	75,57%			-		
Calor aportado	115,2 kW			115 kW		
Potencia generada	78.81 kW			-		
Potencia consumida	48,27 kW			-		
Potencia neta	30,54 kW			30 kW		

Tabla 8: Principales resultados del modelo y de la turbina Capstone C30 [15] [16].

5.3. Análisis de sensibilidad del modelo

CyclePad también nos permite realizar análisis de sensibilidad del modelo. Por ejemplo, supongamos que deseamos conocer cómo la eficiencia térmica del ciclo varía como una función de la eficiencia de un compresor o algún otro componente. Estos análisis son bastante tediosos de hacer a mano, pero este software los realiza y genera dicha información en forma gráfica.

A continuación, mostraremos algunas curvas de sensibilidad de parámetros fundamentales en los equipos principales y del ciclo termodinámico.

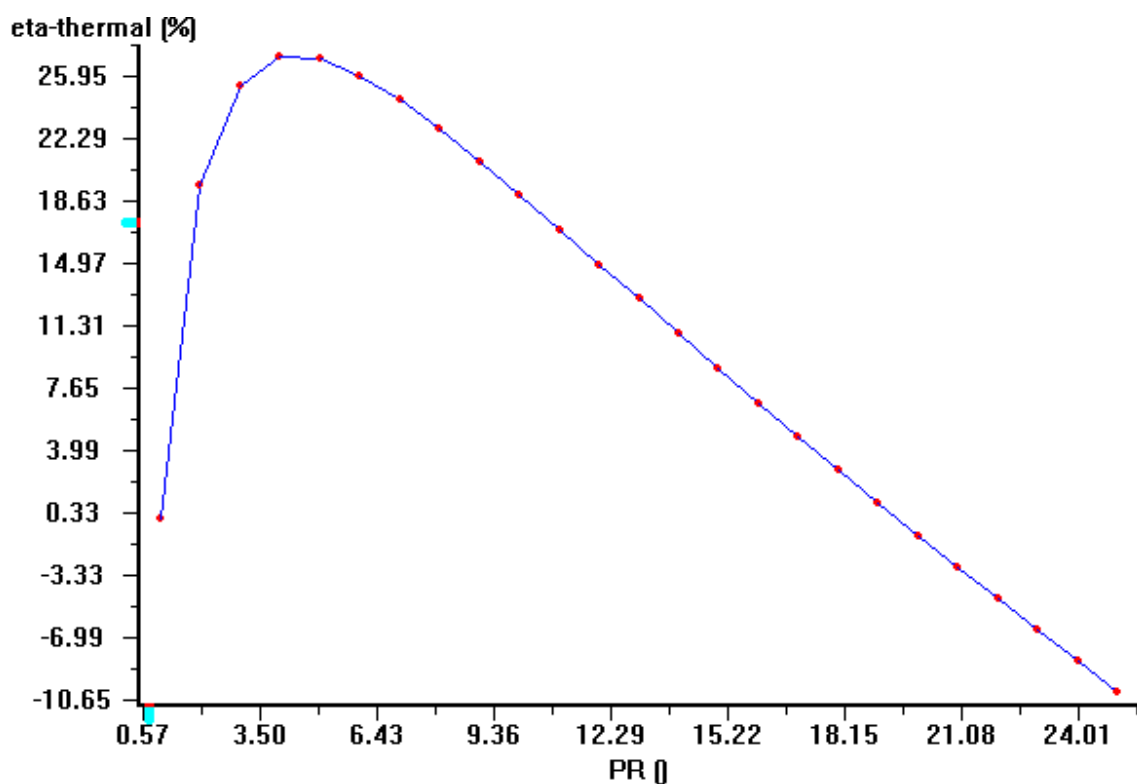


Figura 29: CyclePad rendimiento térmico vs relación de compresión del modelo

En la Figura 29, podemos observar cómo evoluciona el rendimiento térmico del ciclo frente a una variación de la relación de compresión del compresor, siendo máximo el rendimiento con una relación de compresión aproximadamente de 4.

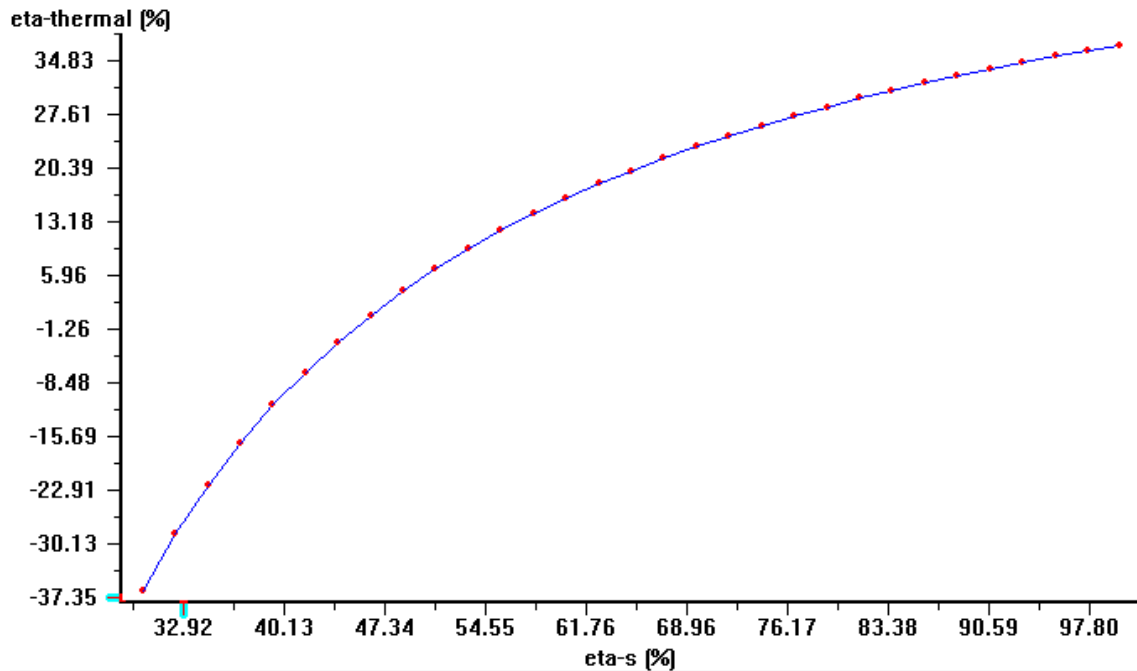


Figura 30: CyclePad rendimiento térmico vs rendimiento isoentrópico del compresor

En la Figura 30, podemos observar cómo evoluciona el rendimiento térmico del ciclo frente a una variación del rendimiento isoentrópico del compresor, aumentando el rendimiento térmico del ciclo conforme aumenta el rendimiento del compresor, aunque llegado a un determinado valor el aumento no es tan elevado.

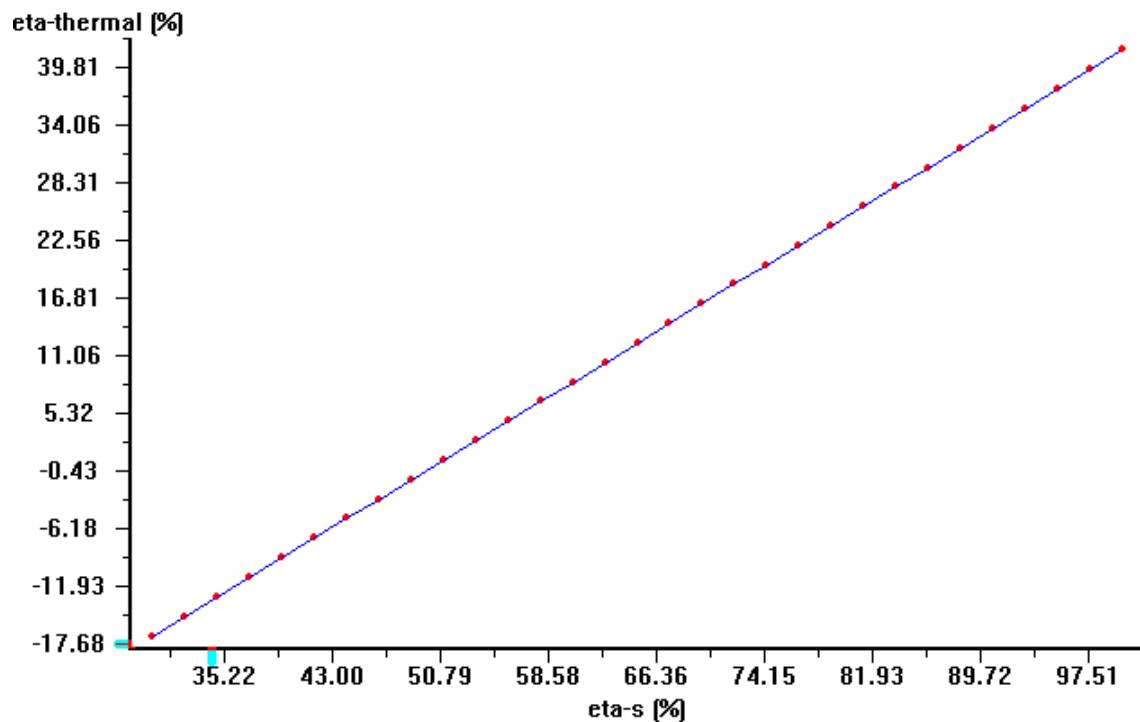


Figura 31: CyclePad rendimiento térmico vs rendimiento isoentrópico de la turbina

En la *Figura 31*, podemos observar cómo evoluciona el rendimiento térmico del ciclo frente a una variación del rendimiento isoentrópico del compresor, aumentando el rendimiento térmico del ciclo linealmente conforme aumenta el rendimiento de la turbina.

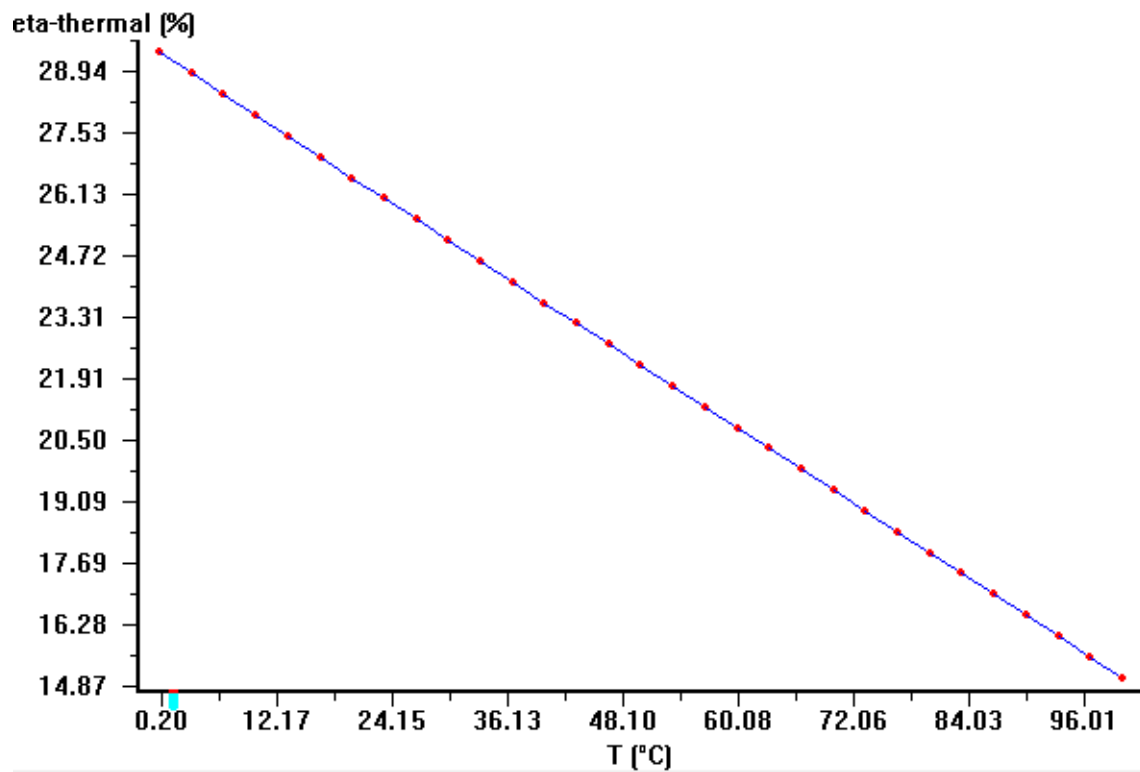


Figura 32: CyclePad rendimiento térmico vs temperatura de entrada al compresor

En la *Figura 32*, podemos observar cómo evoluciona el rendimiento térmico del ciclo frente a una variación de la temperatura de entrada al compresor, disminuyendo el rendimiento térmico del ciclo linealmente conforme aumenta la temperatura.

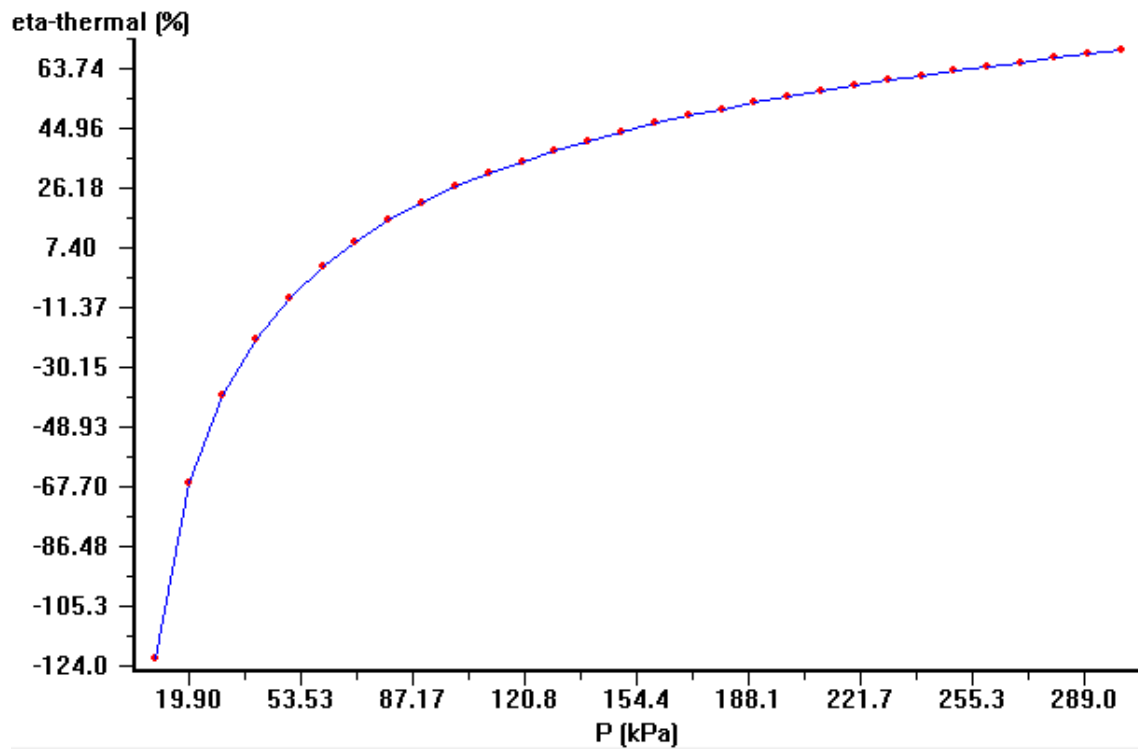


Figura 33: CyclePad rendimiento térmico vs presión de entrada al compresor

En la *Figura 33*, podemos observar cómo evoluciona el rendimiento térmico del ciclo frente a una variación de la presión de entrada al compresor, aumentando el rendimiento térmico del ciclo conforme aumenta la presión, aunque al coger aire del exterior, este entrará a 1 bar.

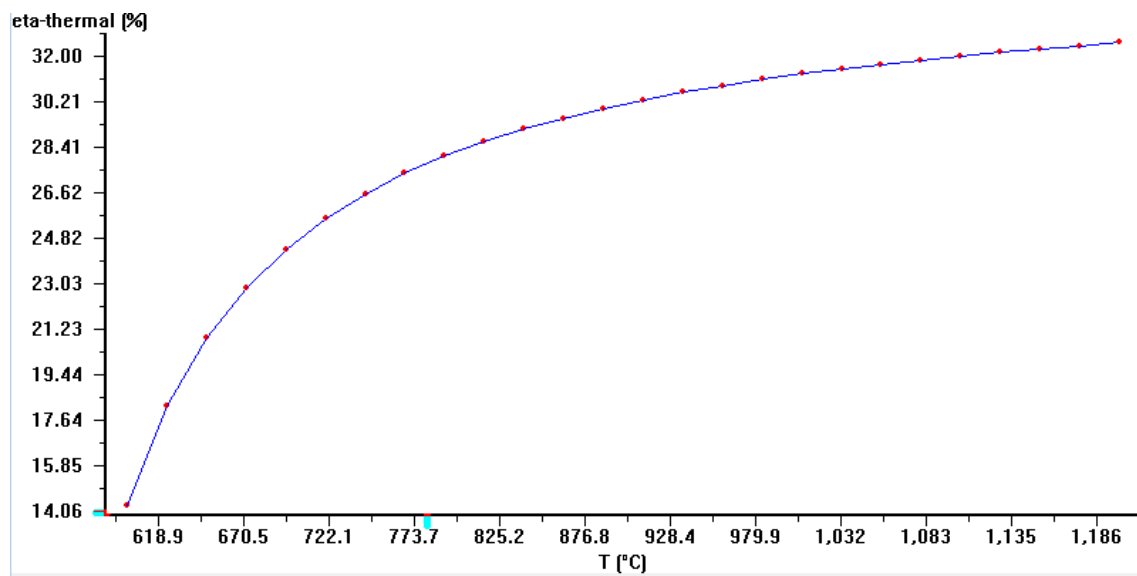


Figura 34: CyclePad rendimiento térmico vs temperatura de entrada a la turbina

En la *Figura 34*, podemos observar cómo evoluciona el rendimiento térmico del ciclo frente a una variación de la temperatura de entrada a la turbina, aumentando el rendimiento térmico del ciclo conforme aumenta la temperatura, aunque tiene limitaciones de diseño y materiales.

6. Análisis económico preliminar

Llegados a este punto, tras haber obtenido toda la información de la situación actual en la que se encuentra el vehículo eléctrico en conjunto con el extensor de rango y haber realizado el modelo del sistema, podemos comenzar un estudio económico para ver los diferentes costes asociados al vehículo modelo.

6.1. Análisis económico

Los datos de partida son los siguientes:

- Consumo promedio vehículo eléctrico: 15 kWh/100 km [26].
- Consumo promedio vehículo diésel: 6 l/100 km [27].
- Consumo promedio vehículo gasolina: 7 l/100 km [28].

En primer lugar, vamos a calcular el coste de recorrer 100 kilómetros con un vehículo de combustión, en este caso diésel por ser el que menos consume dentro de los vehículos de combustión. Se considera un precio de referencia del diésel de 1.2 €/l [29]:

$$1.2 \frac{\text{€}}{\text{litro}} * 6 \frac{\text{litros}}{100 \text{ km}} = 7.2 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 14 \end{array}$$

A continuación, vamos a realizar el mismo cálculo para un vehículo eléctrico suponiendo únicamente carga en un punto de recarga público (*Figura 35*):

$$0.3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 16 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} = 4.8 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 15 \end{array}$$

Proveedor	Precio
Easycharger (Nissan)	0,15€ kW/h
Tesla	0,29€ kW/h
Iberdrola	0,30€ kW/h
Easycharger	0,30€ kW/h
EDP	0,36€ kW/h
Cargacoches	0,38€ kW/h
EMT Madrid	0,40€ kW/h
GIC	0,45€ kW/h
Wenea	0,45€ kW/h
Repsol	0,47€ kW/h
Endesa X	0,49€ kW/h
IONITY	0,79€ kW/h

Figura 35: Precios de recarga de diferentes proveedores en puntos de recarga públicos

Inicialmente, empezamos a ver los ahorros económicos que supone el vehículo eléctrico frente al vehículo de combustión convencional, siendo más económico el vehículo eléctrico.

Las diferencias se amplían, aún más, si la recarga del vehículo eléctrico se realizara en casa, por la noche, con una tarifa especial horaria.

El cargador doméstico tiene un precio aproximado de 500-600 €, que se suman al coste de la instalación, la cual varía en función de los metros de cable que se tengan que instalar y de la complejidad de la obra, pero en total no se superan los 1.500 €. En España, para poder instalar un punto de recarga en un aparcamiento comunitario, es más fácil que en otros países, necesitando únicamente el consentimiento del presidente de la comunidad y posteriormente acudir a un instalador autorizado [30].

TARIFA	€/KWH	€/100KM
2.0 A (P1)	0,13840	2,6
2.0 DHA (P2)	0,07455	1,4
2.0 DHS (P3)	0,06648	1,25

Figura 36: Tarifas horarias domésticas de recarga en el domicilio [31].

En la tabla anterior, *Figura 36*, podemos ver las diferentes tarifas de recarga domésticas según tramo horario, siendo la tarifa 2.0 A una tarifa de precio constante a todas horas, la tarifa 2.0 DHA con un precio P1 en invierno de 12-22h y en verano de 13-23h, y un precio P2 en invierno de 22-12h y en verano de 23-13h, y la tarifa 2.0 DHS con un precio P1 de 13-23h, un precio P2 de 23-01h y 07-13h, y un precio P3 de 01-07h.

El tiempo de recarga para un cargador doméstico de 16 Amperios a 220 Voltios, es decir, un cargador de 3.5 kW aproximadamente, sería de 12 horas de carga, mientras que en los puntos de recarga públicos en los que encontramos potencias de 22 kW a 120 kW serían de 2 horas y 30 minutos respectivamente.

Sabiendo que la batería tardaría en cargarse 12 horas, para el mejor de los casos, suponiendo una tarifa doméstica 2.0 DHS, en la que el usuario cargaría el vehículo en los tramos horarios P3 y P2, obtendría un precio promedio de 0.071 €/kWh, por lo que el coste sería el siguiente:

$$0.071 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 16 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} = 1.136 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}} \quad \text{Ec. 16}$$

Siendo un precio todavía más competitivo.

Pero realmente no siempre se da el escenario más desfavorable ni el escenario más económico, por lo que vamos a calcular un precio medio entre la carga en puntos de recarga públicos y la recarga en el domicilio, dando un precio medio de 0.1855 €/kWh, suponiendo un coste de:

$$0.1855 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 16 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} = 3.016 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}} \quad \text{Ec. 17}$$

La capacidad de la batería de nuestro modelo es de 40 kWh, por lo tanto, con un consumo promedio de 16 kWh/100 km, dispondríamos de una autonomía eléctrica de 250 kilómetros.

Realizar la carga completa de la batería en puntos de recarga públicos, tendría un coste de:

$$0.3 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 40 \text{ kWh} = 12 \text{ €} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 18 \end{array}$$

Realizar la carga completa con tarifa doméstica, tendría un coste de:

$$0.071 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 40 \text{ kWh} = 2.84 \text{ €} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 19 \end{array}$$

Y realizar la carga completa con el precio promedio entre un cargador público y uno doméstico sería de:

$$0.1855 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 40 \text{ kWh} = 7.42 \text{ €} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 20 \end{array}$$

Estos resultados demuestran ser muy favorables, pero seguimos teniendo el inconveniente de que solo tendríamos una autonomía de 250 kilómetros, por lo tanto, si el uso fuera exclusivamente urbano, los datos del cargador doméstico serían relevantes, pero para realizar largos viajes solo aplicarían los datos de los puntos de recarga públicos, que sería dónde competiría nuestro extensor de autonomía.

A continuación, realizaremos unas estimaciones de coste de funcionamiento de la micro-turbina en función de un consumo promedio de la misma.

El consumo horario de combustible (GNC) de nuestra micro-turbina modelo es el siguiente:

$$0.0027 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 7.812 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 21 \end{array}$$

Traduciéndose, con uno precio del gas de 0.9 €/kg [32], en:

$$7.812 \frac{kg}{h} * 0.9 \frac{€}{kg} = 7.03 \frac{€}{h} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 22 \end{array}$$

Coste de llenar el depósito de 20 kilogramos de GNC:

$$0.9 \frac{€}{kg} * 20 kg = 18 € \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 23 \end{array}$$

Dado que la potencia que genera el alternador de la micro-turbina es de 30 kW, tardará en recargar la batería de 40 kWh en 1 hora y 20 minutos.

Por lo tanto, recargar completamente la batería con la micro-turbina tiene un coste de:

$$7.03 \frac{€}{h} * 1.33 h = 9.35 € \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 24 \end{array}$$

Siendo más económico que la recarga de la batería en un punto de recarga público, y más rápido, ya que no existiría la necesidad de detener el vehículo para recargar la batería, realizándose así durante el trayecto.

Una vez obtenido este valor, podemos obtener el coste de gas a los 100 kilómetros, que sería igual a 4.21 €/100 km, inferior a los 4.8 €/100 km de recargar en un punto de recarga público.

Por lo tanto, para ver la autonomía disponible para nuestro vehículo modelo, tendríamos que:

$$7.812 \frac{kg}{h} * 1.33 h = 10.38 kg \text{ de combustible para una recarga} \quad \begin{array}{l} \text{Ec.} \\ 25 \end{array}$$

Siendo la capacidad del depósito de 20 kilogramos de GNC, podríamos hacer 1.93 recargas, por lo que teniendo en cuenta que con una recarga podemos recorrer 250 kilómetros, conseguiríamos una autonomía con la micro-turbina de 425 kilómetros, qué, junto a una recarga eléctrica inicial

de la batería, obtendríamos una autonomía total de 675 kilómetros, siendo mayor que los 500 kilómetros de autonomía del vehículo eléctrico con mayor autonomía actual del mercado [33].

La organización de consumidores OCU difundió el resultado de comparar el coste de tenencia durante 11 años de un vehículo del segmento C, al que pertenece nuestro modelo, al que se realizarían 12.900 kilómetros al año. Según dicha comparativa, el gasto total del eléctrico se sitúa en los 50.823 euros. Solamente sería menor en el caso de un modelo de gas, que supondría un desembolso total de 47.665 euros. Por contra, el mismo vehículo con motor diésel obligaría a gastar 52.721 euros, y 56.323 con propulsor de gasolina.

¿Cuál serían los gastos medios totales de un vehículo?				
Vehículos segmento C	Costes financieros e impuestos	Coste combustible	Mantenimiento y seguro	TOTAL
Pila de combustible	57.571	8.085	8.937	74.593
Híbrido no enchufable de gasolina	33.176	14.278	10.661	58.115
Gasolina	29.811	15.851	10.661	56.323
Híbrido enchufable de gasolina	33.883	5.341	9.627	54.851
Híbrido no enchufable de gasóleo	33.731	10.266	9.999	53.996
Híbrido enchufable de gasóleo	39.890	4.144	9.333	53.367
Diésel	31.583	11.139	9.999	52.721
Eléctrico	39.958	1.928	8.937	50.823
GLP (gas licuado del petróleo)	30.459	10.306	10.661	50.392
Gas Natural	30.716	6.288	10.661	47.665

Tabla 9: Comparativa de costes totales a largos plazos según la OCU (11 años)

Podemos apreciar que el coste total de un vehículo eléctrico es uno de los más bajos junto con el de gas natural, a pesar de tener un mayor precio de adquisición inicial, debido a los bajos costes de mantenimiento y de los combustibles.

Una vez obtenida la *Tabla 9*, vamos a realizar una estimación para ver donde se ubicaría el precio de adquisición de nuestro vehículo modelo con extensor de rango.

Los precios del mercado para las baterías se encuentran actualmente con una pequeña inflación debido a que encontramos muchas start-ups y empresas que están apostando por la movilidad eléctrica, por lo que es cierto que el coste de fabricación está disminuyendo, sin embargo, por la ley de la oferta y la demanda, el precio de los materiales de fabricación de las baterías ha aumentando, aunque se estima que empiecen a bajar un 5 % por cada año que transcurra [34]. Por lo tanto, encontramos precios desde 9000 € para baterías de 35-40 kWh hasta 13000 € para baterías de 80 kWh, siendo estas las más grandes que se suelen colocar en vehículos eléctricos. Este precio incluiría toda la tecnología necesaria para hacer funcionar la batería en el vehículo.

La micro-turbina a utilizar sería la Capstone C30, la cual la encontramos a un precio de 25000 dólares, es decir, con el cambio de dólar a euro serían unos 22500 € [35]. Este precio representaría el precio de comprar una unidad, sin embargo, al comprar grandes cantidades para realizar una fabricación en cadena el precio bajaría bastante. Se incluyen todos los sistemas auxiliares necesarios para el correcto funcionamiento de la micro-turbina y la integración al vehículo.

Por último, nos encontramos con la parte mecánica del vehículo, chasis, sistema de suspensiones, sistema de dirección, carrocería... Este precio se estima de unos 6500 € aproximadamente [36].

Por lo tanto, el precio total de adquisición del vehículo sería de 38000 €, colocándolo justo por debajo del precio de adquisición de un coche eléctrico, favoreciendo en gran medida que el comprador piense en comprar este tipo de vehículos con extensor de rango.

7. Conclusiones

El uso de las micro-turbinas ofrece un gran número de ventajas, en comparación con otras tecnologías de producción de energía a pequeña escala, como pueden ser los motores de gas natural, principalmente:

- La integración de la micro-turbina de gas como extensor de rango es muy favorable debido a sus reducidas dimensiones y peso, ya que es un sistema simple y con pocos componentes, además, no hay necesidad de utilizar aceites lubricantes para su funcionamiento.
- Energía térmica recuperable en una sola corriente. A diferencia de los motores de pistón, las turbinas de gas concentran el calor excedente en una sola corriente a alta temperatura, con lo que se simplifica la instalación. Los gases de escape de las micro-turbinas de gas son generalmente de alta calidad, dado que se encuentran a alta temperatura y libres de aceites.
- Las micro-turbinas en vehículos híbridos permiten, entre otras ventajas, recargar las baterías de los vehículos e incrementar su autonomía y capacidad de carga.
- Como extensor de autonomía, ya sea que se aplique en un vehículo o como un sistema de carga independiente, la turbina puede recargar las baterías en cualquier lugar y en cualquier momento. Elimina por completo el problema que produce la ansiedad por falta de autonomía de los vehículos eléctricos y los inconvenientes de la recarga. Al poder utilizar la infraestructura existente de suministros de combustibles, elimina los problemas que plantea el montaje, el coste y la capacidad de las redes de carga.
- Este tipo de turbina puede funcionar con combustibles renovables como el etanol y el biogás, lo que suavizaría la transición de la era de los combustibles fósiles a la de la electricidad. Debido a su gran eficiencia, se necesitan menos baterías dentro del vehículo eléctrico. Esto ahorra mucho peso, y reduce costes y contaminación.
- Actualmente, se están estudiando las futuras incorporaciones en los vehículos eléctricos, apostando por esta tecnología y fabricándose micro-turbinas más eficientes con sistemas mejor desarrollados, pudiendo entregar altas prestaciones a bajo coste.

- Gracias al ciclo Brayton con regeneración, se disminuye el calor a aportar al ciclo, debido a que los gases de escape de la turbina tienen una temperatura mayor a la de los gases de salida del compresor.
- El coste de recargar las baterías del vehículo eléctrico es más económico con la recarga mediante la micro-turbina de gas que en los puntos de recarga públicos.
- Debido a la inclusión de la micro-turbina en el vehículo eléctrico, obtenemos un aumento sustancial de la autonomía y sin tener que detener el vehículo para recargarlo, pudiendo realizar la carga durante la marcha.
- El resultado de comparar el coste de tenencia durante 11 años de un vehículo al que se realizarían 12.900 kilómetros al año, siendo el gasto total del eléctrico de 50.823 € y el modelo de gas de 47.665 €, mientras que el mismo vehículo con motor diésel obligaría a gastar 52.721 €, y 56.323 € con propulsor de gasolina. El coste total de un vehículo eléctrico es uno de los más bajos junto con el de gas natural, a pesar de tener un mayor precio de adquisición inicial, debido a los bajos costes de mantenimiento y de los combustibles
- El coste de adquisición estimado de este vehículo con extensor de rango es de 38.000 € aproximadamente, siendo más barato que el vehículo eléctrico y corrigiendo varios inconvenientes que podemos encontrar en el vehículo eléctrico.

Referencias

- [1] J. Nourse, “High Efficiency Microturbine with Integral Heat Recovery,” 2011.
- [2] P. D. S.M. Yahya, “Technical Data for the BHEL 500 MW Steam Turbine,” *Turbines, Compressors Fans, Fourth Ed.*, no. Plate 4, 2011.
- [3] C. Soares, *Microturbines: Applications for distributed energy systems.* .
- [4] A. S. Holmes, G. Hong, and K. R. Pullen, “Axial-flux permanent magnet machines for micropower generation,” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 54–62, 2005, doi: 10.1109/JMEMS.2004.839016.
- [5] CONFEDERACIÓN DE EMPRESARIOS DE NAVARRA, “JORNADA DE PRESENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES: ENERGÍA Micro-cogeneración,” pp. 1–35, 2009.
- [6] L. F. Blázquez, “Daimler, Gottlieb,” *OEPM Museo Virtual.* .
- [7] D. Murias, “Historia de los coches eléctricos,” *Motorpasion*, 2019. [Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-de-los-coches-electricos>.
- [8] “El coche eléctrico: una historia que se repite,” *La Vanguardia*, 2018. [Online]. Available: <https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-contemporanea/20180223/47311039683/el-coche-electrico-una-historia-que-se-repite.html>.
- [9] A. Gamero, “CUANDO LOS COCHES ELÉCTRICOS ESTABAN DE MODA (A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX),” *La piedra de Sísifo*, 2017. [Online]. Available: <http://lapiedradesisifo.com/2017/12/27/cuando-los-coches-electricos-estaban-moda-principios-del-siglo-xx/>.
- [10] T. I. Williams, “Dunlop, John Boyd (1840-1921), inventor of the pneumatic tyre,” *J. Chem. Inf. Model.*, 2004, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [11] L. R. Penabad, “Cómo mató Cadillac al coche eléctrico,” *Coches.com*, 2012. [Online]. Available: <https://noticias.coches.com/noticias-motor/como-cadillac-mato-l-coche-electrico/48945>.
- [12] Ibáñez, “El motor de combustión es el más eficiente hoy: FALSO,” *Motorpasion*, 2012.

- [Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-motor-de-combustion-es-el-mas-eficiente-hoy-falso>.
- [13] R. Luis, “Uso del gas natural como combustible más limpio,” pp. 1–34, 2008.
 - [14] K. Mollenhauer, *Handbook of diesel engines*. 2010.
 - [15] S. U. bin A. Adeel Javed, “Conceptual Design and Simulation of a Microturbine: An Electric Car Range Extender Application,” *Univ. Queensland, Adam Head. June 2011*, no. June, 2018.
 - [16] A. Karvountzis-Kontakiotis, A. M. Andwari, A. Pesyridis, S. Russo, R. Tuccillo, and V. Esfahanian, “Application of Micro Gas Turbine in Range-Extended Electric Vehicles,” *Energy*, vol. 147, pp. 351–361, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.051.
 - [17] F. Ji *et al.*, “Experimental and numerical investigation on micro gas turbine as a range extender for electric vehicle,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 173, no. November 2019, p. 115236, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115236.
 - [18] “Jaguar Introduces C-X75 Gas Micro-turbine Extended Range Electric Vehicle Concept,” *Green Car Congress*, 2010. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2010/09/cx75-20100930.html>.
 - [19] A. E. de O. de P. Petroleros, “Combustibles de automoción Revisión y análisis,” *Aop*, 2016.
 - [20] Audi, “Audi g-tron,” 2017.
 - [21] J. Dufour, “Artículo en línea. Obstáculos que aún debe superar el hidrógeno para consolidarse como combustible habitual en motores,” 2013.
 - [22] G. Nadareishvili, A. Kostyukov, and K. Karpukhin, “Design Features when Using an Effective Microturbine as a Range Extending Engine,” *Sci. Tech.*, vol. 18, no. 6, pp. 447–460, 2019, doi: 10.21122/2227-1031-2019-18-6-447-460.
 - [23] Juan Sebastián Hernández Ríos, “METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UNA TURBINA RADIAL PARA UNA MICRO-TURBINA,” *J. Chem. Inf. Model.*, p. 220, 2006, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
 - [24] SEAT Communications, “Así es un coche de GNC por dentro,” *Seat*, 2018. [Online]. Available: <https://www.seat-mediacycenter.es/storiespage/newstories/Asi-es-un-coche-de-GNC-por-dentro.html>.
 - [25] “Tipos de batería para coche eléctrico,” *Electromovilidad*, 2018. [Online]. Available:

- <http://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>.
- [26] Fabio Gemelli, “Tesla Model 3 2020, prueba de consumo real,” *motor1.com*, 2020. [Online]. Available: <https://es.motor1.com/reviews/395398/tesla-model3-2020-prueba-consumo/#:~:text=En la ruta de 360,0%2C09 euros el kWh>.
 - [27] R. A. Marchese and M. A. Golato, “El Consumo de Combustible y Energía en el Transporte,” no. January 2011, pp. 1–9, 2011.
 - [28] A. García and M. Martín, *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión*. 2008.
 - [29] “Precio de la gasolina y diésel HOY España,” *DiéselGasolina.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.dieselogasolina.com/>.
 - [30] D. De and J. Estado, “LEGISLACIÓN CONSOLIDADA Ley 49/1960, de 21 de julio, sobre propiedad horizontal,” pp. 1–19, 1960.
 - [31] Lumios, “Tarifa vehículo eléctrico,” *Red Eléctrica de España*, 2020. [Online]. Available: https://www.esios.ree.es/es/lumios?rate=rate3&start_date=03-02-2020T22:28&end_date=04-02-2020T22:28.
 - [32] “Precio Del Gas Natural Comprimido (GNC) En España,” *glpautogas.info*, 2019. [Online]. Available: [https://www.glpautogas.info/precio-gas-natural-comprimido.html#:~:text=Precio del Gas Natural Comprimido \(GNC\) en España en Estaciones,0%2C89 € %2F kg](https://www.glpautogas.info/precio-gas-natural-comprimido.html#:~:text=Precio del Gas Natural Comprimido (GNC) en España en Estaciones,0%2C89 € %2F kg).
 - [33] E. Musk, “Tesla Model 3,” *Tesla*, 2020. [Online]. Available: https://www.tesla.com/es_es/model3/design#battery.
 - [34] J. F. Calero, “¿CUÁNTO CUESTA LA BATERÍA DE UN AUTOMÓVIL ELÉCTRICO?,” *CLUB ONMOTOR*, 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=sC2B2piVNnI>.
 - [35] TJ GENERAL LLC, “Capstone C30,” *Alibaba.com*, 2020. [Online]. Available: https://us1065718029.fm.alibaba.com/es_ES/productgrouplist-230668912/Microturbina_generador.html?spm=a2700.icbuShop.88.7.5857e3db1Ztnnf.
 - [36] G. G. Alfonsín, “Cuánto cuesta fabricar y vender un coche,” *YouTube*, 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=JFurVETFHqc>.

Bibliografía

- Mataix, C. (1988). *Turbomáquinas térmicas*. Madrid: Dossat.
- Muñoz, M., Payri, F. (1978). *Turbomáquinas térmicas*. Madrid: UPM – ETSII.
- Cohen, Rogers. (1982). *Teoría de las turbinas de gas*. Barcelona: Marcombo.
- Çengel, Boles, (1996). *Termodinámica*. México DF: McGraw Hill.
- Huang, F. F. (1981). *Ingeniería termodinámica*. México DF: CECSA.
- Moran Shapiro. (1995). *Termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté.